

### 3. PORÓZUS SZERKEZETEK

#### 3.1. POLIMER HABOK

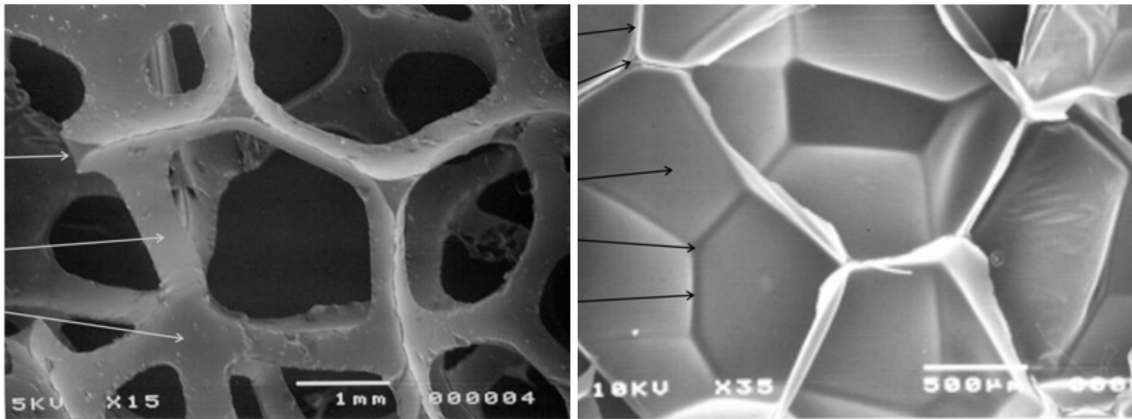
*Szerző: Dogossy Gábor*

A polimer hab fogalma alatt olyan kétfázisú rendszert értünk, amelyben statisztikus eloszlású, változó méretű gázbuborékok találhatók polimer mátrixba ágyazva. Habosított termék készítésére szinte az összes hőre lágyuló, illetve számos térhálós polimer is alkalmas. A habosítást az utóbbi években egyre gyakrabban alkalmazzák a műanyagok feldolgozása során, részben az általa nyerhető kedvező tulajdonságoknak, részben a technológiák fejlődésének, részben pedig a széleskörű alkalmazhatóságának köszönhetően [1-3]

A habosított termékek legjelentősebb előnye a nem habosítottakkal szemben a tömegcsökkenés. Már a műanyagok sűrűsége is jelentősen kisebb a fémekénél, habosítással ez az arány még tovább növelhető. Ugyanazon alapanyag esetén a habosított anyag sűrűsége az eredeténél akár 95%-kal is kisebb lehet. A sűrűségcsökkenés mellett a habosítást használhatjuk bizonyos tulajdonságok módosítására is, ezek közül jelentősebbek az égési képesség valamint a szigetelési tulajdonságok. Nagy mennyiségű habot használ fel az építőipar szigetelésre, mivel habanyagok a tömegcsökkenés mellett jobb hőszigetelő képességűek, mint az alapanyag. Ezeknél a szigeteléseknél nagyon fontos a megfelelő égésgátlás, melyet a megfelelő adalékokkal érnek el. Ezeket a módosítókat a habosító anyaggal együtt juttatják az alapanyagba a feldolgozási folyamat során. A másik nagy iparág, amely sok habot használ fel, az autóipar. Itt az elsődleges szempont a tömegcsökkentés, ezáltal teljesítménynövekedés/fogyasztás csökkenés, illetve az egyre szigorúbb biztonsági előírások miatt szintén kiemelkedően fontos az égésgátlás [1-3]

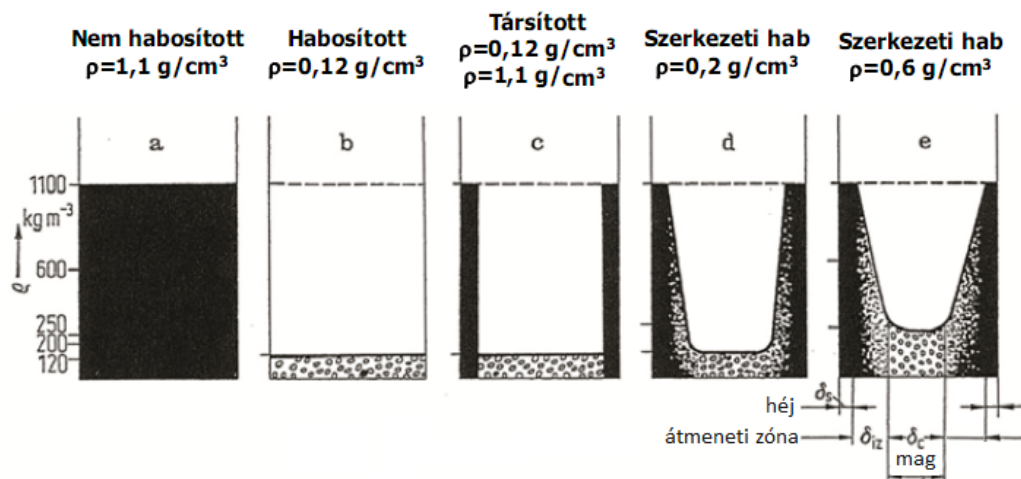
##### 3.1.1. Polimer habok típusai

A polimerhabokat több szempont szerint lehet csoportosítani. Szerkezetük szerint lehetnek nyitott vagy zárt cellásak (3.1.1. ábra). Nyitott szerkezetű haboknál a cellák kapcsolatban állnak egymással, lyukacsos szerkezetű, nem zár magába gázt vagy levegőt. Zárt szerkezetnél az üregek nincsenek összeköttetésben, jól elkülöníthetők egymástól. Ha a cellák falai impermeabilisak, valamennyi gázt tartalmaz. Léteznek vegyes szerkezetű habok is, ahol nyitott és zárt szerkezet is előfordul egy terméken belül.[3-4]



3.1.1. ábra SEM felvételek különböző habszerkezetű anyagokról [5]  
(bal) nyitott cellás PU hab (28 kg/m<sup>3</sup>); (jobb) zárt cellás LDPE hab (24 kg/m<sup>3</sup>)

Struktúrájukat tekintve a habok lehetnek egyenletes eloszlásúak vagy struktúrhabok (3.1.2. ábra). Sűrűségük mindkét típusnál tág határok közt változhat. A szerkezeti haboknak egyre nagyobb jelentőségük van, mivel a műanyag termékek mérete úgy növelhető, hogy közben a tömegük számottevően nem növekszik, illetve mechanikai tulajdonságaik nem romlanak, bizonyos esetekben még javulhatnak is. A szerkezeti habok habosított magrésze és a nem habosított héjrésze is a gyártási folyamat során alakul ki. A magrész alacsony sűrűségű hab, mely a héj felé közeledve egyre több, és kisebb cellából áll, melyek fala egyre vastagabb lesz. A héjhoz közeledve csökken a cellák száma, a termék fala pedig nem habosodott. A habosítatlan felület kellően kemény és szilárd, míg a termék merevségét és kis tömegét a habosított magrész biztosítja. A struktúrhabokkal az egyenletes eloszlású habokhoz képest mechanikailag sokkal jobb termékeket készíthetünk.



3.1.2. ábra Habstruktúrák és jellemző sűrűségi értékek [3]

Elterjedt még a fal merevsége szerinti csoportosítási mód. Ha a fal kemény, a habot rideg, vagy keményhabnak nevezik, amelyek kis rugalmassággal és nagy alaktartóssággal rendelkeznek (pl.: kemény PUR, kemény PVC, PS, UF, PF, EP). Ha a fal nyomás hatására elhajlik, akkor rugalmas vagy lágyhabról beszélhetünk, amelyek nagyobb rugalmasságúak, kisebb alaktartóssággal és merevséggel rendelkeznek (pl.: lágy PVC, lágy PUR, PE). Egyes habok rendelkezhetnek mindkét tulajdonsággal. [2-4, 6]

### 3.1.2. Polimerek habosítási módszerei

A habosítási eljárások alapvetően három csoportba oszthatók, ahogy az a 3.1.3. ábrán látható.



3.1.3. ábra Polimerek habosítási eljárásainak csoportosítása

A **mechanikai** habosítás az úgynevezett „habverési” technológia. Ezt elsősorban kaucsuk latexnél alkalmazzák: mechanikusan kevernek levegőt (diszpergálnak) a koloid tulajdonságú anyaghoz, az így keletkezett habot pedig kivulkanizálják [2]. Általában így habosítanak plasztiszolokat, vinil-észtereket, urea-formaldehideket, fenolszármazékokat és poliésztereket. Linóleumpadlót és szőnyeget készítenek ezzel az eljárással. [4]

A **fizikai** habosításról akkor beszélünk, amikor a hozzáadott segédanyag nem lép reakcióba a reakciókomponensekkel. Ezek közé sorolható a gázinjektálásos, gőzképződésen alapuló, és az adszorpció habosítás.

Gázinjektálás esetében nagy nyomású  $N_2$ , vagy egyéb gázt juttatnak a feldolgozó gépben lévő ömledék állapotú polimerbe. Amint az ömledék extrudálás esetén elhagyja a szerszámot, illetve fröccsöntés esetén bele kerül a fröccsszerszámba, a külső nyomás lecsökken, ennek hatására a polimerben lévő nagyobb nyomású gáz kitágul, kialakítva ezzel a termék habszerkezetét. Szükség esetén gőzképzőkkel elősegíthető a buborékok kialakítása.

A gőzképződésen alapuló módszer poliuretán-habok előállításához használatos. A folyamatban a polimerizációs reakció hőjét hasznosítják oly módon, hogy a reakcióelegyhez alacsony forráspontú folyadékot (pl. pentán) kevernek, melyet a felszabaduló reakcióhő elgőzölögtet – így létrehozva a habszerkezetet. Ahogy az 3.1.1. táblázatban látható néhány fizikai habosítószer, a forráspontjuk általában jelentősen alacsonyabbak, mint a feldolgozási hőmérsékletek, ezért a hajtóanyagok már gáz halmazállapotban lennének a feldolgozás előtt/közben. Ezt elkerülendő, ún. szuperkritikus állapotban kerülnek a habosító anyagok az alapanyaghoz.

Hajtóanyag	Forráspont [°C]	Hajtóanyag	Forráspont [°C]
Pentán	30...38	Metilén-klorid	40
Neopentán	10	Triklór-etilén	87
Hexán	60...70	Diklór-etán	84
Izohexán	55...62	Diklór-tetrafluor-etán	4
Heptán	96...100	Triklór-trifluor-metán	24
Izoheptán	88...92	Triklór-fluor-etán	48
Toluol	110...112	Diklór-difluor-metán	-30
Metil-klorid	-24		

3.1.1. táblázat Néhány fizikai habosítószer és forráspontjaik [7]

Adszorpciós módszer során finom eloszlású adalékanyag segítségével alakítják ki a pórusos szerkezetet. Az ilyen anyagok (pl. korom) felületükön nagy mennyiségű gázt képesek megkötni, adszorbeálni, ami melegítés hatására felszabadul.

Fizikai habosítással könnyebben lehet homogén habszerkezetet elérni, valamint a gyártási biztonsága is jobb, mint a kémiai habosításé. Fizikai habosítószereket általában egyenletes habok létrehozásához használnak [1, 7].

A **kémiai** habosítás csoportjába tartozik a kémiai hajtóanyaggal történő habosítás.

Ilyen például a gázfejlesztéses módszer, amelyet poliaddíció során alkalmaznak, poliuretánok esetében. Az ehhez szükséges izocianát és poliól keverékéhez kevés vizet adagolnak, ennek hatására CO<sub>2</sub> gáz képződik, amelynek segítségével kialakul a habszerkezet.

Továbbá gáz képezhető még szerves vagy szervetlen kémiai habosítószerek (CBA: Chemical Blowing Agent) adagolásával. Ezek finom eloszlású porok, melyeket 0,25-1 m% koncentrációban kevernek szárazon a polimerhez. Ezt követően a feldolgozási művelet során a hő hatására, amint eléri a bomlási pontot, a habosítószer elbomlik, miközben a típusától függő gáz keletkezik (pl. CO, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub>). A kémiai habosítók lehetnek – a bomlásuknál lejátszódó kémiai folyamat szerint – endoterm (mely hőt von el a környezetétől) vagy exoterm (mely hőt termel) típusúak. Az exoterm habosító hátránya, hogy kellemetlen szagúak bomláskor és a termék is átveszi ezt a szagot és szilárd bomlástermékei károsak az egészségre, ezért Európában tiltott az élelmiszeripari felhasználása. Az endoterm habosító bomlástermékei a vízgőz és a szén-dioxid, ezért szagtalan és nem károsítja a felhasználót. Hátránya, hogy bomláskor szilárd inert sók maradnak a hátra és a magas feldolgozási hőmérséklet miatt a vízgőz reakcióba léphet a polimerrel. Előfordul, hogy a kettő keverékét alkalmazzák. Az exoterm habosító segíti a szerszámban a térkitöltést, mivel az azzal történő habosítás során nagyobb mennyiségű és nyomású gáz fejlődik. Az endoterm folyamat a vetemedés elkerülését segíti elő.

A kémiai habosítószerek széles hőmérséklettartományban alkalmazhatók, ahogy azt a 3.1.2. táblázatban is látjuk, így könnyen kiválaszthatjuk az alapanyagunk és a feldolgozási technológiának megfelelőit. Az N, N'-dinitrozo-pentametilén-tetramin az egyik legolcsóbb és legelterjedtebb habosítószer, ugyanakkor nehezen alkalmazható keverékekben, illetve rázkódásra érzékeny. Az N, N'-dimetil-N, N'-dinitrozo-tereftálamid az alacsony bomlási hőmérséklete miatt jól alkalmazható egyenletes habok létrehozásához. Hátránya hogy nedvességre érzékeny, illetve keverékekben nehezen oszlatható el. A következő polimerekhez alkalmazzák: PVC (vékony termékek esetén), PUR, PS, PA. A 4,4'-oxo-bisz-benzol-szulfonil-hidrazid az egyik legjobb habosítóanyag. Gázképződési karakterisztikájának köszönhetően kiválóan alkalmas sok, apró cellás hab létrehozására. Nem mérgező, és nem bocsájt ki szín- és szaganyagokat. Használható például PVC-hez, poliolefinokhoz, poliszulfidokhoz, gumihoz, és különböző keverékekhez [6-7].

Hajtóanyag	Bomlási hőmérséklettartomány műanyagban [°C]	Gázfejlődés [ml/g]
N, N'-dimetil-N, N'-dinitrozo-tereftálamid	90...105	126
Azo-bisz-izobutiro-nitril (azo-izo-vajsav-dinitril)	90...115	130
4,4'-oxo-bisz-benzol-szulfonil-hidrazid	130...140	125
N, N'-dinitrozo-pentametilén-tetramin	130...190	265
Azo-bisz-formamid (azo-dikarbon-amid)	160...200	220
p-Toluol-szulfonil-szemikarbazid	225...235	146
5-Fenil-tetrazol	240...250	190
Trihidrazin-triazin	265...290	225

3.1.2. táblázat Néhány kémiai habosítószer és főbb jellemzőik [7]

A habosodás nyomáskülönbség hatására végbemenő sűrűségváltozás eredménye. A habképződés folyamata három fázisra bontható:

- buborék keletkezése (a habosítószer által képzett gócpontokból),
- buborék növekedése (gömbszerű, mivel egy adott térfogat esetén a gömbnek van a legkisebb felülete, ezért a felületi energia a gáz-folyadék határfelületen ekkor lesz minimális),
- hab stabilizálása [1, 8-9].

A feldolgozási eljárás során egy ideális kémiai habosítószernek a következő tulajdonságokkal kell rendelkeznie:

- bomlási hőmérséklete a feldolgozási hőmérséklet tartományában legyen,
- könnyen adagolható és elosztható legyen,
- termeljen nagy mennyiségű gázt,
- ne korrodálja a csigát és a szerszámot,
- ne legyen hatással a mechanikai tulajdonságokra,
- ne okozzon lerakódást vagy elszíneződést,
- bomlástermékei ne lépjenek kölcsönhatásba a polimerrel.

A kémiai habosítószernek mind a standard (PP, PE, stb.), mind pedig a műszaki műanyagokhoz (PET, PA, PC, stb.) is alkalmazható, de fokozott figyelmet kell fordítani arra, hogy a hordozóanyag a célpolymerrel összeférhető legyen, illetve a habosító anyagot a bomlási hőmérséklete és a kívánt habminőség szerint kell kiválasztani [10].

### 3.1.3. Polimer habok gyártási technológiái

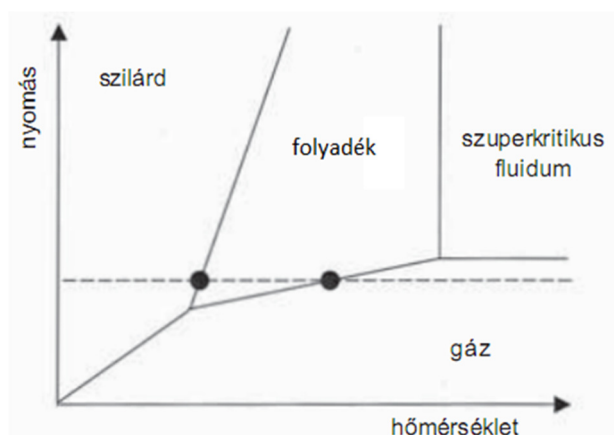
Habokat gyárthatunk a hagyományos polimer feldolgozási technológiákkal (pl.: extrúzió, fröccsöntés), de léteznek külön habanyag előállító technológiák.

### 3.1.3.1. Fröccsöntés

A fröccsöntés az egyik legtermelékenyebb feldolgozási technológia, mellyel jellemzően vékony falú termékeket állítunk elő a néhány milliméterestől a több méteres darabokig. A technológia hátránya, hogy vastag falú termékek nehezen gyárthatók, mert beszívódások keletkeznek rajta, illetve bizonyos esetekben túl sok anyagfelhasználást eredményez. Erre a problémára fejlesztették ki a habosított fröccsöntést (vastagabb falú termékek esetén a gáz- és vízbefúvásos technológia mellett). Fröccsöntés során alkalmazhatunk kémiai és fizikai habosítást is [11].

Kémiai habosítás esetén szerkezeti habot gyártunk, mert a termék külseje (ami a temperált szerszám falával érintkezik) általában tömör, míg a termék belseje felé a habosított rész aránya és ezzel együtt a cellák mérete növekszik. A folyamat során önzáró fúvókát kell alkalmazni, illetve nagyobb torlónyomást, hogy a plasztikálás alatt ne habosodjon az alapanyag. A szerszámüreg teljes kitöltését nem a bejuttatott anyag mennyiségével, hanem a habosodással érjük el, illetve utónyomást sem alkalmazunk.

Fizikai habosítószer alkalmazásakor az eljárást mikrohagyártásnak, vagy MuCell eljárásnak is nevezik. A habosító olyan gáz, mely nem lép reakcióba az alapanyaggal és semmilyen más anyaggal a folyamat során (pl.: szén-dioxid). Ezt a gázt ún. szuperkritikus állapotban (3.1.4. ábra) adjuk az alapanyaghoz. Ez azt jelenti, hogy addig kell összenyomni, míg eléri ezt az állapotot, ahol a folyadék állapotbeli összenyomhatósága és gáz állapotbeli keveredési képessége jellemző rá.



3.1.4. ábra Szuperkritikus állapot [11]

E tulajdonságai kedvezőek, mert nagyon pontosan lehet adagolni, emellett a viszkozitása is jelentősen kisebb, mint az ömledéké. A jobb folyóképesség miatt az adalékanyag könnyebben és egyenletesebben oszlik el az ömledékben, és a feldolgozás hőmérsékletét és a fröccsnyomást csökkenteni lehet az eredetihez képest. Az utónyomás szerepét itt is a felszabaduló gáz nyomása veszi át. Mindezekből következik a rövidebb hűtési idő, rövidebb ciklusidő, egyenletesebb nyomáseloszlás, jobb termékminőség. A legtöbb műanyagnál alkalmazható (tömeg- és műszaki műanyagok), és olyanoknál is, amelyeknél a kémiai habosítás nem megvalósítható (pl.: nagy hőállóságú anyagok)[11].

### 3.1.3.2. Extrúzió

A fröccsöntés mellett az extrúzió a másik legtermelékenyebb eljárás. Folyamatos technológia, mellyel jellemzően egy dimenziós (egyik irányban végtelen kiterjedésű) termékeket gyártunk. Ezek jellemzően fóliák, lemezek, csövek, különféle profilos termékek. Extrudereket használunk

még további technológiákhoz az alapanyag megömlesztéséhez és folyamatos adagolásához (pl.: palackfűvés, fóliafűvés). Az extruder felépítése a fröccsöntő aggregátéhoz nagyon hasonló, azonban itt a csiga csak forgómozgást végez, axiális mozgást nem. Az extruder csiga nagyon sokféle felépítésű lehet. Legjellemzőbb az egy bekezdéses, háromzónás (behúzó, kompressziós, homogenizáló) mag-progresszív csiga. Az extruder után az általunk kívánt terméknek megfelelő szerszámot kell alkalmaznunk, illetve megfelelő követő berendezéseket [2, 7].

Az extrúzió kiválóan alkalmas habosított termékek gyártására, fizikai és kémiai habosítással egyaránt. Kémiai habosítószer használatával általában nagyobb sűrűségű habokat gyárthatunk, mint a fizikai habosítással. Az alapanyaghoz CBA hozzáadásával közvetlenül gyárthatunk habot az extruderrel, csak a megfelelő szerszámozásról, a követő berendezésekről kell gondoskodnunk, illetve a technológiai paramétereket a megfelelő értéken tartani. Ügyelni kell a habosítószer bomlási tulajdonságaira (hőmérséklet, gázfejlesztés), meg kell akadályozni, hogy az adagoló garat közelében elkezdjen bomlani az anyag, és a keletkező gáz visszaáramoljon. Emellett figyelni kell a nyomásviszonyokat a hengerben. Fizikai habosítószer alkalmazásakor hasonlóan kell eljárni. Gázbefűvéses habosításnál az extruderhez külön csatlakoztatjuk a gázbevezető rendszert, mely a már megömlött alapanyagba nagy nyomáson juttatja be a kívánt habosító gázt (CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, stb.) A hengerben uralkodó nyomás hatására a gáz nem távozik ki, csak azt elhagyva, a szerszámban habosítja az alapanyagot. Mindegyik módszernél szükséges a megfelelő szerszám kialakítás, kellően hosszú vasaló szakasszal, temperálással. A szerszám „hideg” falával érintkezve az ömledék megszilárdul, szerkezeti hab alakul ki. A termék belsejében a habosítószer miatt továbbra is nagyobb nyomás van, ezért hosszú vasaló szakasz, vagy megfelelő kalibráló berendezés szükséges, ami meggátolja a termék vetemedését, amíg az megfelelő szilárdságú nem lesz [2-3, 7].

Számos helyen találkozhatunk habosított polimerekkel (3.1.3. táblázat). Jellemző felhasználási területe az építőipari szigetelés, hő- és elektronikai szigetelés, és alkalmazzák különféle csomagolási anyagként.

Jellemző	PP	PS	PET	LDPE
<b>Sűrűség (kg/m<sup>3</sup>)</b>				
Tömör anyag	900	1050	1350	914-928
Kémiai habosítással	350-700	500-700	800-1100	500-700
Fizikai habosítással	30-100	35-50	-	15-100
<b>Alkalmazási példák</b>				
Kémiai habosítással	díszítő szalagok, díszcsomagolás	hústálcák, joghurt-poharak, szigetelő-fóliák	menütálak	hűtőtáskák, geofóliák
Fizikai habosítással	gyümölcs-csomagolás	hústálcák, tálcavédő betét	lemezek	védőfóliák, tömítések

3.1.3. táblázat Extrúziós habosítás utáni sűrűség és felhasználás [13]

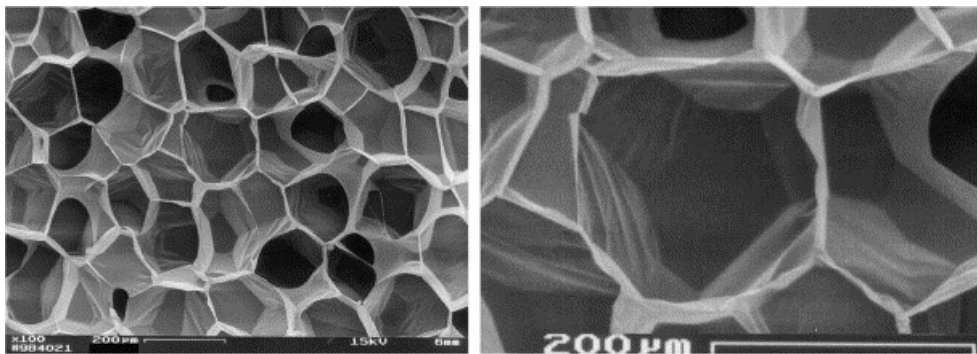
### 3.1.3.3. Habosított (expandálható) polisztirol – EPS

Közismert néven hungarocell. Gyártása során első lépésként PS gyöngyöket állítanak elő - ez gyöngy-polimerizációval történik: a stirolhoz polimerizációja során, vagy utólag, nyomás alatt alacsony forráspontú pentánt adagolnak. Ezt követően gőzzel elő-habosítás történik (105-110°C), ami 2-20-szoros térfogat-növekedéssel jár. A következő lépés a silóban történő

pihentetés, 8-15 óra hosszan, szobahőmérsékleten. Ez alatt a pentán kondenzál, lassú zsugorodás lép fel, és a habcellák fala szilárdabbá válik. Az így elő-habosított gyöngyöket alakadó formába helyezik, gőzzel felhabosítják (110-115°C), aminek hatására 10-20%-os térfogat-növekedés alakul ki. Ez belső nyomást eredményez, mely által a PS gyöngyök összehegednek. A habosítás után vízűtéses alakrögzítés következik, majd a terméket eltávolítják a szerszámból. Az így kapott hab kiváló hőszigetelő képességet mutat, jól alakítható, és egészségre, környezetre nem veszélyes [12]. A hagyományos expandált polisztirol hab részben nyitott cellaszerkezetű hab.

#### 3.1.3.4. Extrudálható polisztirol – XPS

Gyártás során a polisztirol granulátumhoz kémiai habosító anyagot adagolnak az extruderben. Ez a plasztikáló egységben hő hatására elbomlik. A széles résű szerszámból kilépő megolvadt anyag a külső, alacsonyabb nyomás hatására habosodik. Ezzel az eljárással zárt cellaszerkezetű habot állíthatunk elő. A 3.1.7. ábra az XPS hab szerkezetét, és egy cella nagyított képét ábrázolja. A falak orientálatlanul alakultak ki, a cellák pedig közel ötszögletűek, és lényegesen nagyobbak, mint a falvastagság [12].

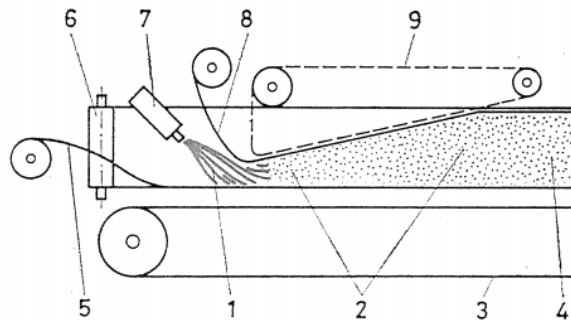


3.1.7. ábra: XPS hab szerkezete [12]

#### 3.1.3.5. PUR hab

Poliuretán habokat alapvetően három típusra oszthatjuk: lágy-, kemény- és integrálhabok. A kiindulási alapanyagok a diizocianát, polioliol és a habosítószer. Előállításuk poliaddícióval történik – olyan kémiai reakció, amely során nem képződik melléktermék. A kiindulási alapanyagokat összekeverik, majd a termék alakjának függvényében szakaszos (megfelelő formaadó szerszámba adagolás) vagy folyamatos eljárással dolgozzák fel. A folyamatos eljárás berendezésének vázlatát az 3.1.8. ábra szemlélteti. A kiinduló anyagokat (diizocianát és polioliol) (1) egy erre alkalmas keverőfejben (7) összekeverik, majd a keveréket egy egyenletes sebességgel haladó szalagra viszik fel (3), ahol a hőmérséklettől függően felhabosodik az anyag (2, 4). A geometriát terelőlemezekkel (6, 9) szabályozzák, a habanyag és a felületek közt leválasztó fólia (5, 8) van [7]. Felhasználása széleskörű: szigetelőanyag, autóalkatrész, csomagolástechnika területén, stb. [2-3, 13-14].





3.1.8. ábra Folyamatos PUR-hab gyártás [7]

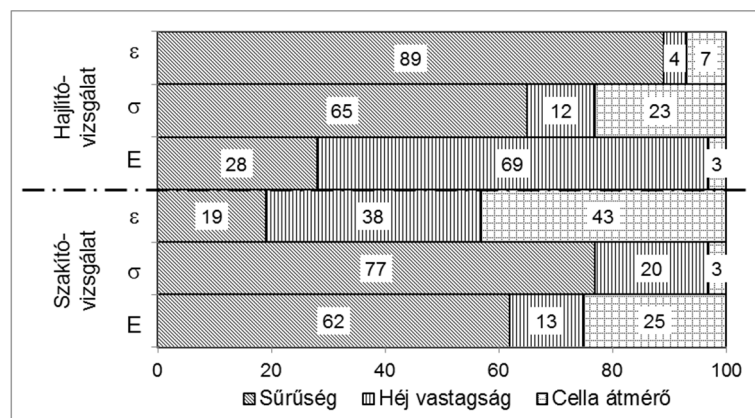
### 3.1.4. A polimer habok szerkezetének hatása

Német kutatók fizikai habosítással fröccsöntött eltérő habszerkezetű termékeket vizsgáltak, annak a szemléltetésére, hogy az egyes szerkezeti jellemzők változásának mekkora súlya van az adott mechanikai tulajdonság kialakításában. Kutatásuk során vizsgálták, hogy a cellanagyság hogyan befolyásolja, a szilárdságot vagy a sűrűség csökkenését hogyan lehet a cellaméret és a héjvastagság változtatásával kompenzálni, hogy a merevség közben ne csökkenjen [15-16].

Eredményeiket az 3.1.4. táblázatban és a 3.1.9. ábrában foglalták össze, amelyekkel szemléltethető, hogy a szerkezeti jellemzők relatív súlya eltérő húzó- és hajlító vizsgálatnál. A sűrűség változtatása jelentős hatással van a húzó modulusra, míg hajlítás esetén a héjvastagságnak van fontosabb szerepe. A cellanagyság a hajlítószilárdságnál fontosabb, mint a húzószilárdságnál, a sűrűség változása mindkét jellemzőre hatással van. A cella nagysága nagymértékben a szakadási nyúlással van összefüggésben, míg a maximális feszültségnél mért nyúlás értéke a sűrűséggel függ össze. A héj vastagsága kevésbé hat a húzó modulusra és a húzószilárdságra, de a szakadási nyúlásra annál is inkább. Ha a cellaméretet növeljük, a szakadási nyúlás is nő, mivel azok akadályozzák a repedések növekedését. A hajlítási vizsgálatoknál is hasonló értékelést kaptak. A sűrűség változása nélkül, a hajlító modulus növelhető a héj vastagságának növelésével. Az anyag merevségét nem lehet szabályozni a cellamérettel. A maximális hajlítószilárdságot finom habszerkezettel érték el.

	Szakítóvizsgálat			Hajlítóvizsgálat		
	E	$\sigma$	$\epsilon$	E	$\sigma$	$\epsilon$
Sűrűség	↑↑	↑↑	↓	↑	↑↑	↑↑
Héj vastagság	↓	↑	↑↑	↑↑	↑	–
Cella átmérő	↑↑	–	↓↓	–	↓↓	–

3.1.4. táblázat A habszerkezet kvalitatív hatása a termék mechanikai tulajdonságaira [16]

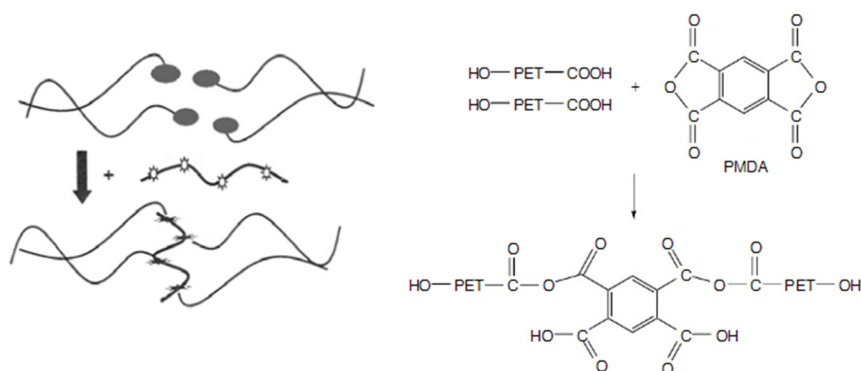


3.1.9. ábra A habszerkezet kvantitatív hatása a mechanikai tulajdonságokra [16]

### 3.1.5. PET habosítása

PET és RPET habokat egyre szélesebb körben alkalmaznak az iparban. Ennek főbb okai a kiváló mechanikai tulajdonságok viszonylag alacsony ár mellett, illetve egyre több „tisztá” (kizárólag palackokból származó) PET hulladék áll rendelkezésre, ez megkönnyíti az újrafeldolgozást. Az irodalomban, interneten egyre több alkalmazási példát találunk. Az építőiparban lakóházak szigetelőanyagaként alkalmazzák egyre több helyen. Az autóiparban különböző kapcsolókhöz, alkatrészekhez használható fel. Az utóbbi években a szélerőművek rohamos elterjedésének köszönhetően kutatások indultak az e téren való felhasználásra, és ma már a lapátok habosított maganyagaként több helyen találkozhatunk vele. Ezt a jó merevségének és hőállóságának köszönheti. Mivel az energiahasznosítás ezen formája még most is jelentősen fejlődik, ezért e területen a felhasználás növekedése várható. Az autóalkatrészekon kívül a járműipar számos egyéb területein is alkalmazzák, vagy kísérleteznek az alkalmazásával, például a hajógyártásban (hajótesteknél, kabinok belső részeinél, merevítéseknél), személy- és teherszállításnál (vonatok külső és belső burkolati elemei, kamionok, buszok burkolatai, lakóbuszok és lakóautók burkolati elemei), repülőgépek alkatrészeinél. Különböző sporteszközöknél is alkalmazható (pl.: ütők, szörfdeszka). A kompozitoknál alkalmazott PET vagy RPET a gyanták széles skálájával jól alkalmazható. Egy európai fejlesztés eredményeképp létrehoztak egy hétrétegű lemezt (PET hab – kötőanyag – PE – kötőanyag – EVOH – kötőanyag – PE), melyből vákuumformázással csomagolóipari tálcát készítenek [18-21].

PET habosításakor kellő figyelmet kell fordítani az alapanyag szárítására, mert a hidrolízis miatt az ömledék belső viszkozitása csökken, ennek hatására nem alakul ki megfelelő nyomás a fúvóka előtt, romlik az ömledékstabilitás, a buborékok eloszlása és mérete nem lesz megfelelő, a nagyobbak felszakadnak, ezek rossz felületi minőséget okoznak. A reciklált anyagoknál is tapasztalható ez a jelenség, mely komoly problémát jelent a többszöri újrafeldolgozás során, mivel az alapanyag, s így a termék minősége is romlik. Ennek kiküszöbölésére a feldolgozás során a kémiai habosítószer mellett úgynevezett lánc hosszabbítót is adagolnak az alapanyaghoz (3.1.10. ábra). Ez a feldolgozás során összeköti a láncokat, így javulnak a mechanikai tulajdonságok, növekszik a viszkozitás. Léteznek emellett elágazást létrehozó típusok is, melyek a keresztirányú kötéseket gyarapítják [1, 22].



3.1.10. ábra Lánchosszabbító adalék elvi és tényleges (PMDA) működése [1, 22]

Néhány lánchosszabbító adalékanyagot és főbb jellemzőit tartalmazza a 3.1.5. táblázat. Az egyik legelterjedtebb adalék a PMDA. 0,05-0,25% közt alkalmazható, de az ajánlott intervallum 0,15-0,25% közt van. A lánchossz növekedésével nő a polimer belső viszkozitása, mely fontos az újrafeldolgozáshoz. A jobb viszkozitás miatt az anyag habosítható lesz, extrudálással, fúvással vagy fröccsöntéssel is. A jobb mechanikai tulajdonságok miatt az anyag (bizonyos alkalmazásoknál) használható lesz az újrafeldolgozás során szilárd-fázisú polikondenzációs lépés kihagyásával is, de mindenképp csökken e folyamat ideje. A PMDA legnagyobb előnye hogy az ömledék viszkozitást a habosítható tartományba növeli. Alacsony belső viszkozitás esetén a gázbuborékok összeomlanak, összeérnek és egyesülnek. A PMDA mellett egy másik nagy hatásfokú lánchosszabbító a TMA, mely az összekapcsolható láncvégek számát növeli. A PBO családba tartozó adalékok (pl.: 1,3-PBO, 1,4-PBO) jellemző adalékolási aránya 0,4-1,5% közt van, azonban 0,6% fölé nem ajánlott menni általános esetekben. Nagyon reaktív komponens. Alkalmazásával általában néhány tized dl/g viszkozitás növekedés érhető el. A diepoxide típusú lánchosszabbítók kismértékű adalékolásával rövid reakcióidő alatt érhetünk el jó eredményeket. Jellemzően sok új kötést hoz létre, melyek keresztkötés jellegűek, ezek erősen befolyásolják a nyúlási tulajdonságokat. A tetraepoxide adalékok alkalmazásával az anyagban véletlenszerűen jönnek létre elágazódó molekulák, ennek következményeképp jól habosítható lesz, emellett jó zárt cellás hab kialakítását teszi lehetővé. A CBC az egyik legújabb lánchosszabbító szer. Alkalmazásakor a reakció során némi kaprolaktam szabadul fel. A viszkozitás növekedése az adalékolt mennyiségtől függ, általában 0,5% körüli mennyiséget szoktak alkalmazni. PET habosításra az egyik legjobb adalék. Gyakran kombinálják PBO-val a jobb viszkozitás növelés érdekében (pl.: 1,2% CBC+PBO egycsigás extruderben, 300°C-on a belső viszkozitást 1,6-ról 2,0 dl/g-ra növeli) [22].

Megnevezés	Rövidítés, márkanév	Gyártó	Adalékolás [m%]
Pyromellitic dianhydride	PMDA	Nippon Shokubai Allco Chemical	0,15..0,25 (0,05..2)
Trimellitic anhydride	TMA	-	-
Phenylenebisoxazoline	PBO	Mikuni (Japan)	0,4..0,6 (0,4..1,5)
Carbonyl bis(1-caprolactam)	Allinco CBC	DSM	-
Diepoxide bisphenol A-diglycidyl ether	Epon 1009	Shell	0,6
	Epon 828		
Tetraepoxide tetraglycidyl- aminodiphenylmethane resins (TGDDM)	MY721	Ciba SC	0,4..0,6
Triphenylphosphite	TPP	-	0,2..0,8

3.1.5. táblázat Néhány lánchosszabító adalék és javasolt adagolási arányuk [22]

A PET habok különböző területeken történő felhasználása különböző sűrűséget kíván meg. Az autóiparban, burkolati elemekhez  $100-300 \text{ kg/m}^3$ , csomagoláshoz  $350-700 \text{ kg/m}^3$ , építőiparban, illetve nagy hőmérsékletek esetén szigeteléshez  $30-100 \text{ kg/m}^3$  sűrűségi tartományok a jellemzőek. A habosításhoz a PET belső viszkozitása legalább  $1 \text{ dl/g}$  kell legyen. Ezt a problémát régebben nem, vagy nehezen tudták megoldani, mára azonban a habosítószeres és a lánchosszabító adalékok fejlődésének köszönhetően jól megoldható a PET és RPET habosítás [17].

Az alkalmazott habosítószeres lehetnek szénhidrogének, HCFC-k, szén-dioxid, vagy ezek kombinációi. A HCFC-k alkalmazása kiszorult az iparból a környezetre való ártalmasságuk miatt. Jellemzően kémiai habosítószereseket alkalmazunk, mint pl. AZNP (azo-dikarbon-amid), 5PT (fenil-tetrazol), néhány tized tömegszázalékban. PET habosításhoz általában kevés (maximum néhány m%) habosítóanyagot adunk, hogy a felszabaduló gázmennyiség ne okozzon minőségi problémákat a hab szerkezetében [17].

Egy amerikai kutatás során a PET habok szendvicsszerkezetek magjaként történő felhasználását kutatták, és a kész szerkezetek mechanikai jellemzőit vizsgálták. A kutatók többféle mintát előállítottak, nagy- ( $>0,8 \text{ g/cm}^3$ ), kis sűrűségű ( $0,2-0,8 \text{ g/cm}^3$ ) tartományban, emellett vizsgáltak nagyon kis sűrűségű ( $<0,2 \text{ g/cm}^3$ ) mintákat is. A nagy sűrűségű próbatestek előállítása széles résű szerszámmal történt. Az alapanyagok belső viszkozitása jellemzően  $0,6-0,7 \text{ dl/g}$  értékek közt változott,  $1-3 \%$  CBA és  $10-15 \%$  egyéb módosító anyag (adalékok, lánchnövelő, égésgátló) tartalommal. A kis sűrűségű habok előállítása gázbefúvásos (nitrogén, szén-dioxid) technológiával történt, itt az alapanyag belső viszkozitása nagyobb volt (min.  $0,9 \text{ dl/g}$ ), mint az előző esetben. Ezután  $25 \text{ mm}$  vastag szendvicsszerkezeteket készítettek egy, ill. többregetű, különböző sűrűségű PET hab magokkal, melyeket különböző kereskedelmi termékekkel (PVC lap, PS hab, fa lapok) hasonlítottak össze. A tesztelés során hárompontos hajlítással vizsgálták a szerkezetek mechanikai tulajdonságait [23-24].

Az eredményeket több szempont alapján is érdemes vizsgálni. A tönkremenetelkor mért maximális erőt tekintve a PET magok nagyon jól teljesítettek, a „gyári” lapokkal megegyező,

vagy annál jobb terheléseket értek el, sőt, egy esetben több mint 6-szoros terhelést bírt el a lap, mint a legjobb kereskedelmi termék. Ugyanakkor ezek az eredmények nem feltétlenül mérvadók, ugyanis nem derül ki a tönkremenetel formája, illetve a maximális terhelőerőnél fontosabb paramétereket is meg kell vizsgálni (szilárdság, merevség). A modulust és a szilárdságot tekintve PET habok nagyjából azonos eredményt értek el fajlagos sűrűséget tekintve. Van olyan minta, ami kicsivel az átlag feletti modulussal rendelkezik, de a szilárdsága kicsivel az átlag alatt van, ugyanakkor a többi szorosan az átlaghoz illeszkedik. Az eredmények alapján elmondható, hogy nem egy kiemelkedő, de egy versenyképes felhasználási területe lehet ez a PET haboknak, ugyanakkor további fejlesztések során jelentős előrelépések várhatók [23-24].

A PET zárt cellás habként történő újrahasznosítását vizsgálta három kutató Svájcban. A kísérlet során eredeti és reciklált PET-et habosítottak fizikai habosítással ( $\text{CO}_2$ ). A PET habosításában több nehezítő körülmény is szerepet játszik, ezek közül a legfontosabbak a feldolgozási hőmérséklet és a reológiai tulajdonságok. A PET feldolgozási hőmérséklete  $260^\circ\text{C}$  körül van (néha ezt meg is haladhatja). Ilyen magas hőmérsékleten nehéz pontosan tartani a technológiai paramétereket, ez pedig jelentős befolyással lehet a termék minőségére. A másik jelentős hátrány a viszkozitás, mely a hőmérséklet növelésével csökken, illetve a belső viszkozitás, mely az anyag molekulatömegével egyenesen arányos. Újrafelhasznált anyagnál ez jelentősen eltér az eredetitől, és gyakran nem csak megnehezíti, hanem lehetetlenné teszi a feldolgozást. Habosításnál ez fokozottan érvényes, ezért szükséges a molekulaláncok növelése. Ehhez számos adalék létezik, jelen vizsgálatban ezért az alapanyagot adalék nélkül, illetve 0,3m% és 0,5m% epoxi hozzáadásával dolgozták fel. A vizsgálatoknak három célja volt: megfelelő láncnövelő adalékot találni és vizsgálni, majd az ezzel módosított alapanyagok belső viszkozitását és molekulatömegét vizsgálni, végül szuperkritikus  $\text{CO}_2$  felhasználásával zárt cellás habot előállítani nagynyomású tartályban, és vizsgálni a kialakult habszerkezetet. A habosítás előtt egy ikercsigás extruderrel készítették el az alapanyagot, itt keverték bele a szükséges epoxi mennyiségét. Ezt megelőzte egy gyúrókamrás teszt, ahol a reaktív technológiát tesztelték, mert a folyamat exoterm, és akár  $20^\circ\text{C}$ -t is emelkedhet a hőmérséklet a feldolgozás során. Az így elkészült anyagokat ezután egy tartályba tették, amit nagy nyomású (300 bar), szuperkritikus  $\text{CO}_2$ -dal töltöttek meg, majd  $275^\circ\text{C}$ -on tartották 15 percig. Ezután különböző nyomás- és hőmérsékletcsökkentési profilokat alkalmazva készültek el a habok, melyeket különböző vizsgálatoknak vetettek alá [25].

A vizsgálatokat az egész folyamat során végezték. Az első a gyúrókamra nyomatéka a keverési idő függvényében. Adalék nélküli egy meredek de rövid nyomatékemelkedést követően egy meredek csökkenés tapasztalható, majd 2 perc után a nyomaték egyre lassabban, de tovább csökken. A görbe mindkét alapanyagnál hasonló, de R-PET esetében néhány Nm-rel alacsonyabb értékek vannak. Adalékolt (0,3m% és 0,5m% epoxi) esetén a görbe indulása hasonló, ám a kezdeti visszaesés után növekedés tapasztalható, majd ezután a 0,3m% adaléknál kismértékű csökkenés végig, a 0,5m% adaléknál újabb emelkedés látható. Ezek a kialakult új kapcsolatok számával magyarázhatók. Ezzel szoros összefüggésben vannak a molekulatömegek is. Általánosságban elmondható, hogy az epoxi hatására jelentős, 1,5-2-szeres molekulatömeg növekedés is tapasztalható volt, illetve az R-PET értékei azonos körülmények közt mindig elmaradnak az eredeti alapanyagétól [25].

A viszkozitás értékek is a várhatónak megfelelően alakultak: az adalékolt anyagok viszkozitása jelentősen meghaladja az adalék nélküliekét, ugyanakkor érdemes megjegyezni, hogy az epoxival módosított R-PET jelentősen nagyobb viszkozitást ért el, mint az adalékoltalan eredeti [25].

A habosítás során csak az adalékolt minták esetén sikerült értékelhető eredményt elérni, ugyanis az eredeti és a reciklált alapanyag adalék nélkül nem habosodott megfelelően (összeesett az anyag). A 0,3m% epoxival adalékolt esetekben az eredeti PET-ből sikerült zárt cellás, finom habszerkezetet kialakítani, míg R-PET esetén a habosítási paraméterek megfelelő beállításával (alacsonyabb hőmérséklet) szintén sikerült zárt cellás habszerkezetet létrehozni [25].

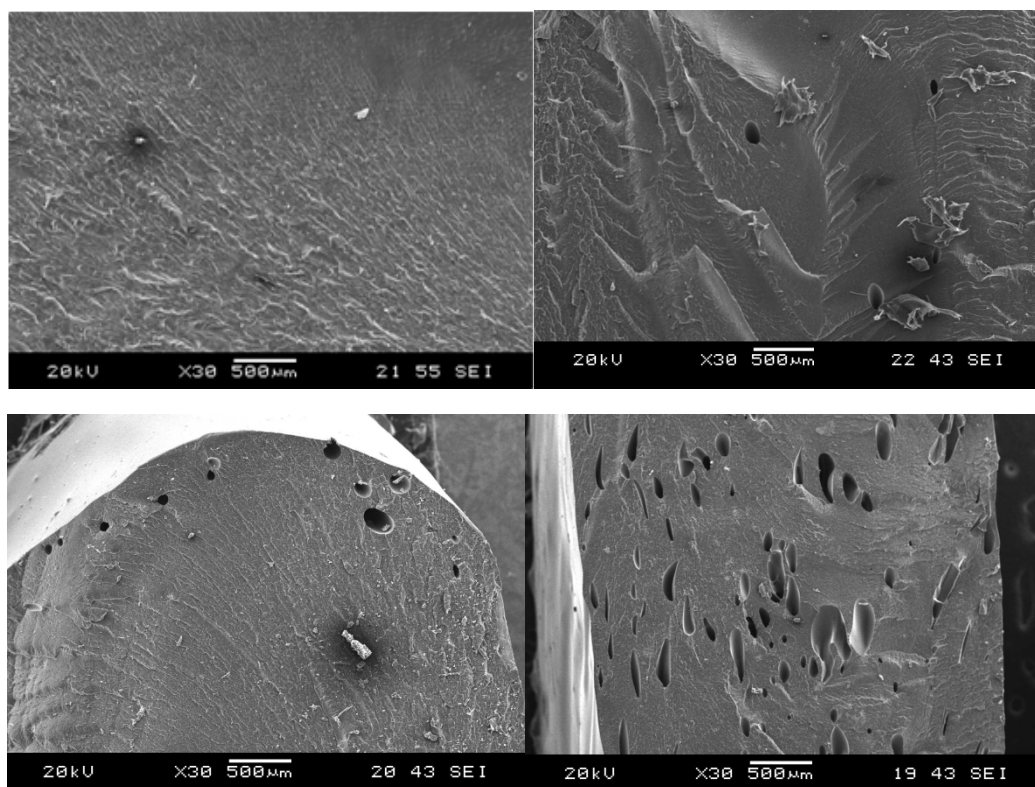
### 3.1.6. rPET kémiai habosítása extrúzióval

Kísérleteink során [26] 100% rPET-et vizsgálatunk 0, 2, 4, illetve 6% habosítószer tartalom (Endex, Safoam) mellett. Ezt követően Clariant láncnövelő mesterkeverék (CESA-Extend) hozzáadásával (1 és 2%) is legyártottuk ugyanezeket a sorozatokat. Az extrudátumok sűrűségét, és mechanikai tulajdonságait vizsgáltuk.

#### 3.1.6.1. Habosítószer tartalom hatása

Az első sorozatot Endex típusú habosító hozzáadásával készítettük el, a mintákról készült elektronmikroszkópos felvételeken látható a habosodás jellege (3.1.11. ábra).

A képeken megfigyelhető, hogy jelentős buborékképződés csak 4% illetve 6% habosítószer hozzáadásakor történt. Előbbi esetében egyenletes méretű buborékok alakultak ki, viszont elsősorban csak a darab szélén, utóbbinál azonban már túlzott mértékű habosodásról is beszélhetünk, mivel megfigyelhetők "összenyomott" buborékok - ezeket az extruder utáni követő berendezés (szállítószalag és henger) okozta.



3.1.11. ábra Habosított rPET (0, 2, 4, 6% Endex habosítószerrel)

### Sűrűségvizsgálat

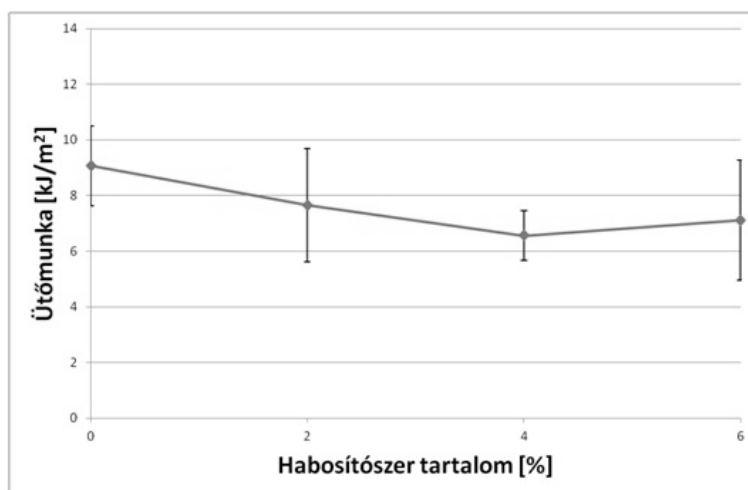
Az elvégzett sűrűségvizsgálat eredményét a 3.1.12. ábra tartalmazza. Jelentős sűrűség csökkenés a 4 illetve 6% habosító tartalom esetében figyelhető meg, tehát a buborékképződés ezekben az esetekben volt a legintenzívebb.



3.1.12. ábra rPET sűrűségének alakulása a habosítószer tartalom függvényében

### Ütőmunka vizsgálat

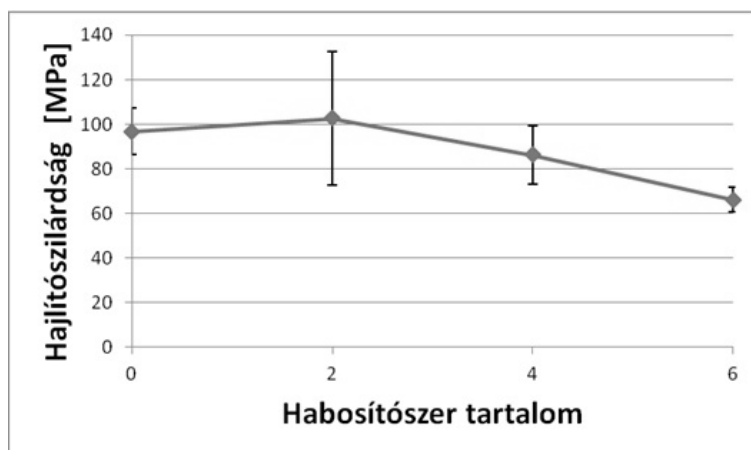
A Charpy vizsgálat eredményeképp kapott ütőmunka értékek a habosítószer tartalom függvényében a 3.1.13. ábra szerint alakultak. Megfigyelhető, hogy nagyobb arányban hozzáadott habosító hatására a próbatestek ütőmunkával szembeni ellenállása, szívóssága csökken.



3.1.13. ábra rPET ütőmunkájának alakulása a habosítószer tartalom függvényében

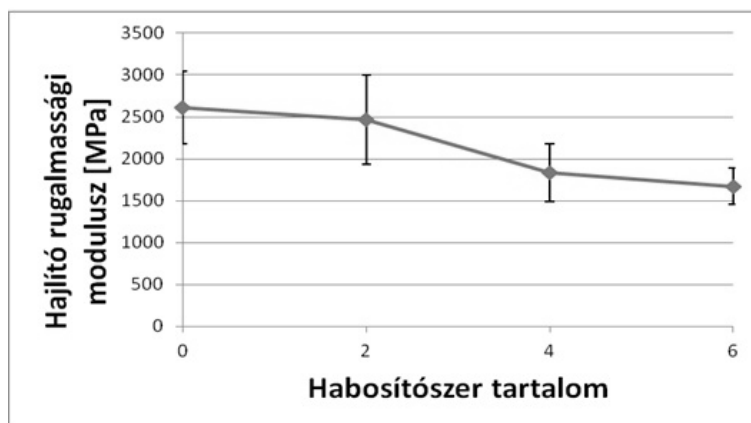
### Hajlító vizsgálat

A hajlító görbék jellege alapján megállapítható, hogy az anyag 6% habosítószer tartalom mellett viselkedik a legszívósabban, míg 2% hozzáadásakor a legridegebben. A 3.1.14. ábra az rPET hajlítószilárdsági értékeit mutatja be a habosítószer tartalom függvényében. Megfigyelhető, hogy minél nagyobb arányban van jelen az adalékanyag, annál jobban csökkent a próbatestek szilárdsági értéke.



3.1.14. ábra Hajlítószilárdság a habosítószer tartalom függvényében

A meghatározott rugalmassági modulusok (3.1.15. ábra) esetében is hasonló összefüggés figyelhető meg - a habosítószer tartalom növelésével csökkennek a modulus értékek, vagyis az anyag merevsége.



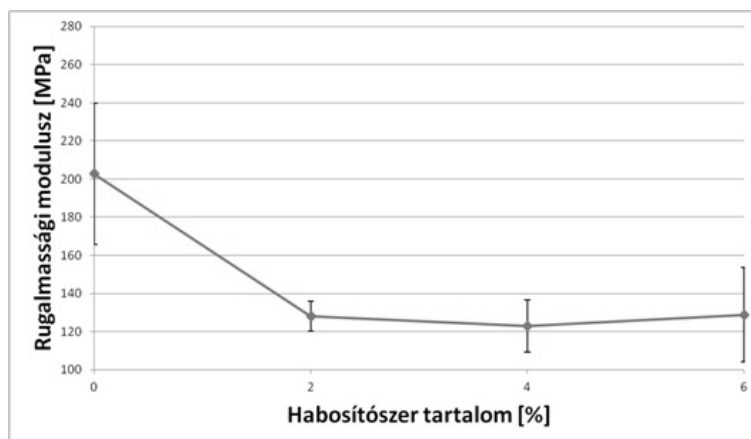
3.1.15. ábra Hajlító rugalmassági modulus a habosítószer tartalom függvényében

A hajlító vizsgálat eredményeiből kiderült, hogy a reciklált PET hajlító igénybevétellel szembeni ellenállása a habosítószer tartalommal fordítottan arányos. A változás mértéke 2% habosítószer hozzáadásakor volt a legkisebb.

### Nyomó vizsgálat

A nyomó vizsgálat elvégzése után a számítógép által rögzített mérési értékeket erő-elmozdulás diagramokon ábrázoltam, majd a rögzített értékekből meghatároztam a darabok rugalmassági modulusait (3.1.16. ábra). Az eredményekből kiderül, hogy habosítószer hozzáadásával a modulus értékek jelentősen csökkennek a 100% rPET-hez képest.



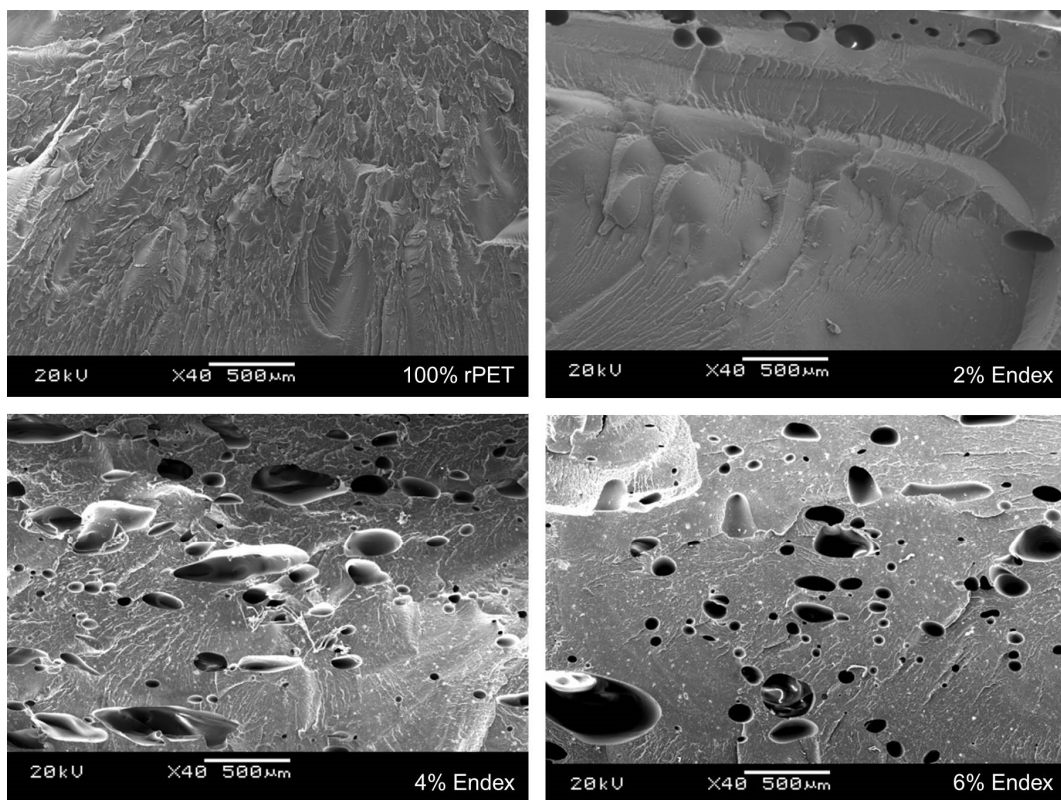


16. ábra Nyomó vizsgálatból adódó rugalmassági modulus a habosítószer tartalom függvényében

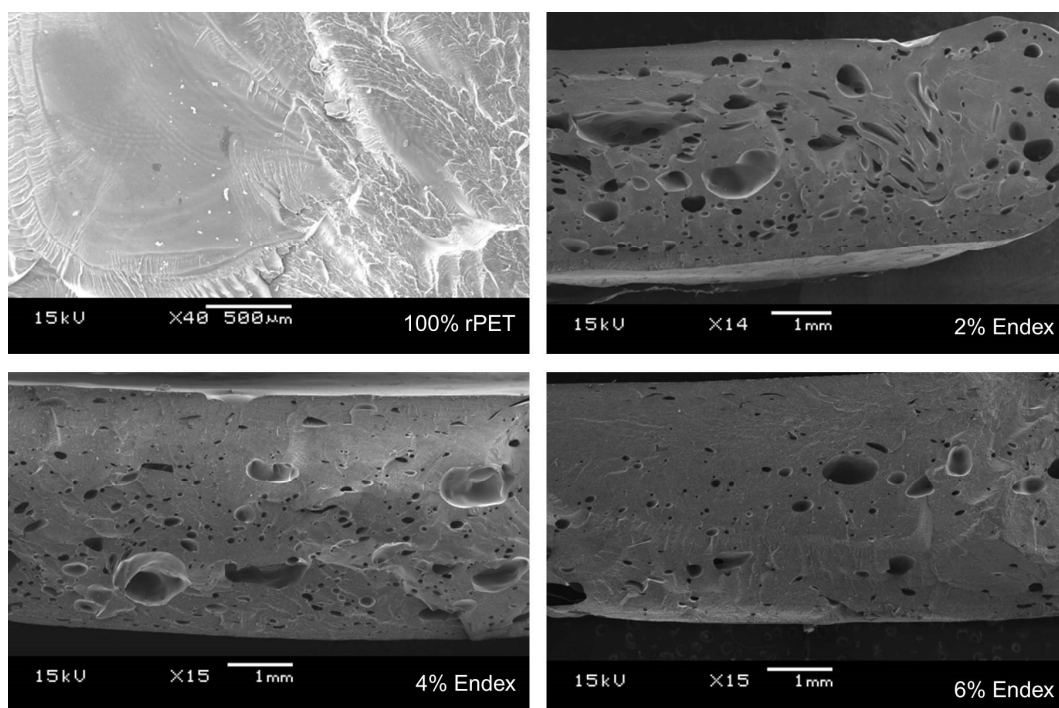
### 3.1.6.2. Láncnövelő hatása

A további kísérleteinket [26] Clariant láncnövelő mesterkeverék (CESA-Extend) hozzáadásával (1 és 2%) folytattuk. Ebben az esetben szintén Endex habosító adalékot alkalmaztunk.

Az elektronmikroszkópos képek (3.1.17. és 3.1.18. ábra) 500X-os nagyításán látható, hogy a 100% rPET esetén a láncnövelt darabok szerkezete rétegesebb lett, a töretfelület nem egyenletes, mint a láncnövelő nélküli esetben - tehát az anyag szívósabb. A 2% habosítószert tartalmazó minták képein megfigyelhető, hogy a láncnövelő adalék a habosodást elősegítette, azonban 1% hozzáadásakor csak a darab külső részén alakultak ki buborékok. Ezzel szemben 2% adagolásakor a teljes keresztmetszetben történt habosodás, viszont mind a méretük, mind pedig az eloszlásuk rendszertelen volt. A 4% habosító tartalomnál, 1 és 2% láncnövelő hozzáadásakor is a buborékok mérete és eloszlása egyenetlenné vált (néhány esetben túl nagyok, és szabálytalan alakúak lettek), emellett eloszlásuk sem volt megfelelő. A 6% habosító tartalom mellett a buborékok formája szabálytalan volt, melyen a hozzáadott 1% láncnövelő javított, továbbá helyenként azok méretét is növelte. Emellett szintén megfigyelhetők a 2% láncnövelő-tartalom esetében a darab szélén látható "összenyomott" buborékok.



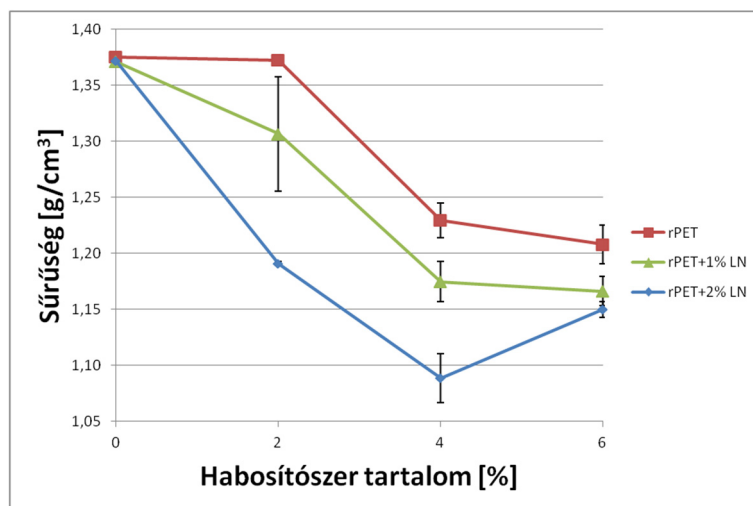
3.1.17. ábra Habosított rPET 1% láncnövelővel (0, 2, 4, 6% Endex habosítószerrel)



3.1.18. ábra Habosított rPET 2% láncnövelővel (0, 2, 4, 6% Endex habosítószerrel)

### Sűrűség vizsgálat

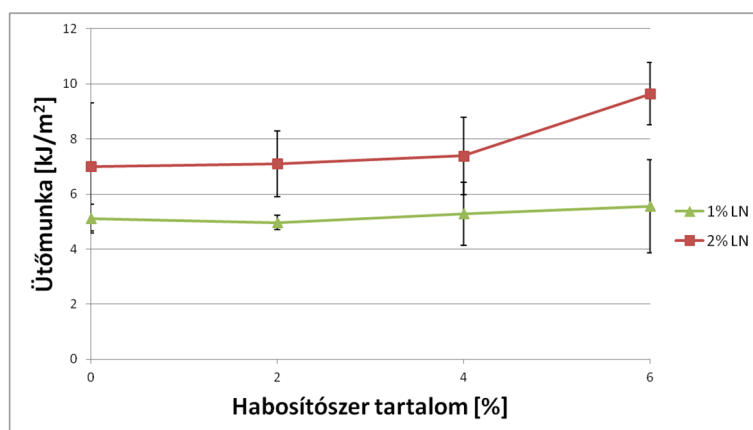
A gyártott darabok sűrűség-vizsgálatának eredményein (3.1.19. ábra) látható, hogy már 1% láncnövelő adalék hozzáadása is változtatott az rPET értékein, 2% esetében pedig igazán jelentős sűrűség-csökkenés volt tapasztalható - főképp 2 és 4% habosítószer tartalom mellett.



3.1.19. ábra Láncnövelő hatása a sűrűség értékekre

### Ütőmunka vizsgálat

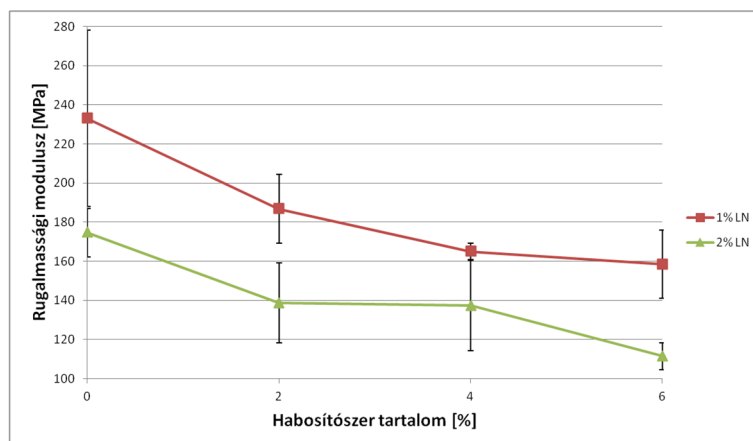
A 3.1.20. ábrán az rPET fajlagos ütőmunkájának az alakulása látható a hozzáadott habosítóanyag függvényében, a különböző láncnövelő-tartalom mellett. Megfigyelhető, hogy anyag szívóssága 2 és 4% habosítószer tartalom esetében romlik a leginkább, vagyis a habosodás ezekben az esetekben a legjelentősebb. Emellett a láncnövelő mesterkeverék alkalmazása is láthatóan csökkentette a darabok ellenállását az ütőmunkával szemben.



3.1.20. ábra Láncnövelt rPET fajlagos ütőmunka vizsgálata a habosítószer függvényében

### Nyomó vizsgálat

A nyomóvizsgálatból adódó rugalmassági modulust a habosítószer tartalom függvényében ábrázoltam, különböző láncnövelő tartalom mellett (3.1.21. ábra). Az ábrán látható, hogy láncnövelő hozzáadásakor a darabok ellenállása nyomó igénybevétellel szemben folyamatosan csökken a habosító tartalom növelésével. Megfigyelhető továbbá, hogy ez a csökkenés nagyobb mértékű 2% láncnövelő tartalom esetében - vagyis a minták ebben az esetben jobban habosodtak.

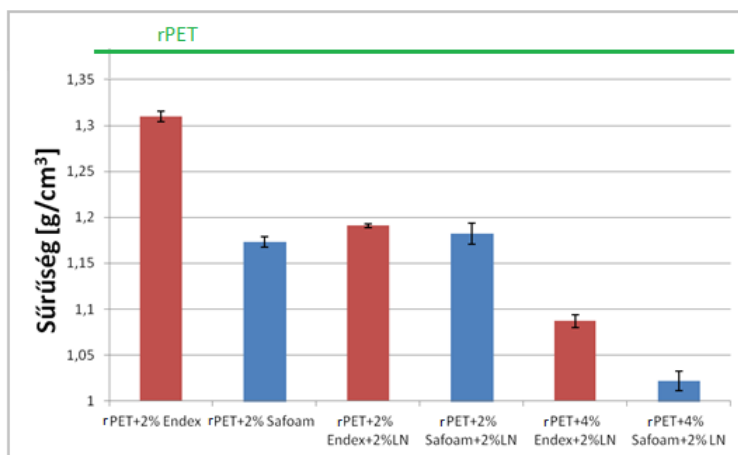


3.1.21. ábra: rPET nyomó rugalmassági modulusza

Összefoglalva tehát, egyenletes minőségű darabok gyártása a reciklált PET lecsökkent ömledék szilárdsága miatt több nehézségbe ütközött (pl. a darabok elhúzása), amelyeket sikerült kiküszöbölni a láncnövelő alkalmazásával. Emellett pedig megállapítható, hogy jelen kísérlet-sorozatban a továbblépéshez a legmegfelelőbb összetételt 2% láncnövelő, és 4% habosítószer tartalom mellett értük el.

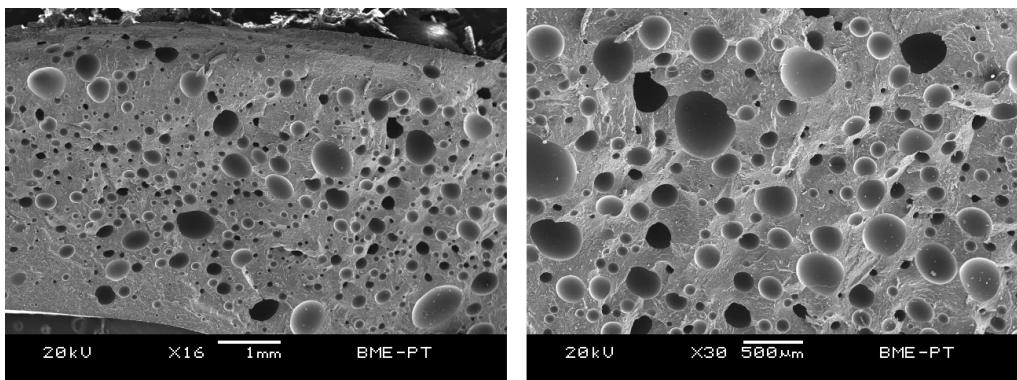
### 3.1.6.3. Habosítószer fajta hatása

Következő lépésben a célunknak leginkább megfelelő habosítószeret választottuk ki. Legyártottuk a korábbi sorozatokat Safoam habosító hozzáadásával is, majd a összehasonlítottuk a sűrűségi értékeit a már meglévő Endex tartalmú mintákkal. A kapott eredményeket 3.1.22. ábrán összegeztük. Az adatokból kiderül, hogy 2 illetve 4% Safoam habosító adagolásával a sűrűség csökken a 2 és 4% Endexszel habosított darabokhoz képest, 2% láncnövelő adagolásával, és anélkül is.



3.1.22. ábra: Endex és Safoam habosítószer összehasonlítása

Megállapítható tehát, hogy a felhasznált habosítószerek közül, szalaggyártás során a Safoam mesterkeverékkel nagyobb mértékű habosodás érhető el, vagyis jelentősebb a sűrűségcsökkenés.



3.1.23. ábra: rPET + 2% LN + 4% Safoam

### 3.1.7. rPET kémiai habosítása fröccsöntéssel

A kísérletsorozat során [27] különböző habosító-anyagokat hasonlítottunk össze, illetve a technológiai paraméterek habosodásra gyakorolt hatását vizsgáltuk. A gyártás során egy ciklus közbeni kismértékű (0,1 mm-es) szerszámnyitást is alkalmaztunk. Ezzel a beállítással próbáltuk javítani a termékek habosodását. A minták gyártásához kétféle hőmérsékleten – 50°C és 150°C – szárított regranolátumot használtunk. A kétféleképpen szárított anyag reológiai tulajdonságai jelentősen eltérnek, ezt a 3.1.6. táblázatban látható MFI értékek is bizonyítják. A magasabb hőmérsékleten szárított anyag MFI-je több mint kétszer kisebb volt, mint az alacsony hőmérsékleten szárított, ami az utóbbi anyagban maradó nedvességtartalom által okozott hidrolitikus degradációval magyarázható. Ez az eredményekre jelentős hatással volt.

Alapanyag		RPET regranulátum	
Szárítási hőmérséklet	[°C]	50	150
MFI	[g/10 perc]	58,6	27,9

3.1.6. táblázat Különböző hőmérsékleten szárított RPET regranolátum MFI értékei

A kísérletsorozat 3 fő szakaszra bontható, a technológiai beállítások – utónyomásprofil, átkapcsolási pont, szerszámhőmérséklet – vizsgálatára. Egyszerre mindig csak egy paramétert változtattunk, hogy csak annak a termékre gyakorolt hatását figyelhessük meg. A kész termékeken vizsgáltuk a kialakult habszerkezetet, felületi minőséget, illetve a mechanikai tulajdonságokat.

#### 3.1.7.1. Utónyomás hatásának vizsgálata

##### Habszerkezet, felületi minőség

Az extrúziós kísérletek alapján kiválasztott összetételt alkalmazva (rPET 2% láncnövelő és 4% habosító adalékkal) vizsgáltuk az utónyomások habszerkezetre gyakorolt hatását. Három utónyomás-profillal és kétféle hőmérsékleten szárított alapanyaggal 6 sorozatot gyártottunk. Az adatokat és az alkalmazott beállításokat a 3.1.7. táblázat tartalmazza.

Jelölés	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
Alapanyag	RPET + 2% láncnövelő + 4% Safoam hab.					

Szárítási hőmérséklet [°C]	50	50	50	150	150	150
Utónyomás (p <sub>1</sub> ) [bar]	600	600	400	400	600	600
Utónyomás (t <sub>1</sub> ) [s]	6	3	2	2	3	6
Utónyomás (p <sub>2</sub> ) [bar]	400	400	200	200	400	400
Utónyomás (t <sub>1</sub> ) [s]	2	1	1	1	1	2
Utónyomás (p <sub>3</sub> ) [bar]	50	50	50	50	50	50

3.1.7. táblázat Alapanyag szárítási hőmérsékletek és utónyomásprofilok

A (7) és (10) próbatesteknél alkalmazott utónyomásprofilra „nagy-”, a (8) és (11)-nél alkalmazottra „közepes-”, a (9) és (12)-nél alkalmazottra „kis” utónyomásként fogunk utalni.

A (7-9) sorozatoknál az alapanyag szárítási hőmérséklete 50°C volt, az utónyomás nagyságát és idejét fokozatosan csökkentettük. Ennek következtében a habos réteg vastagsága a darabokban egyre nagyobb lett (3.1.24. ábra), a buborékok kisebbek lettek és sűrűbben helyezkedtek el.



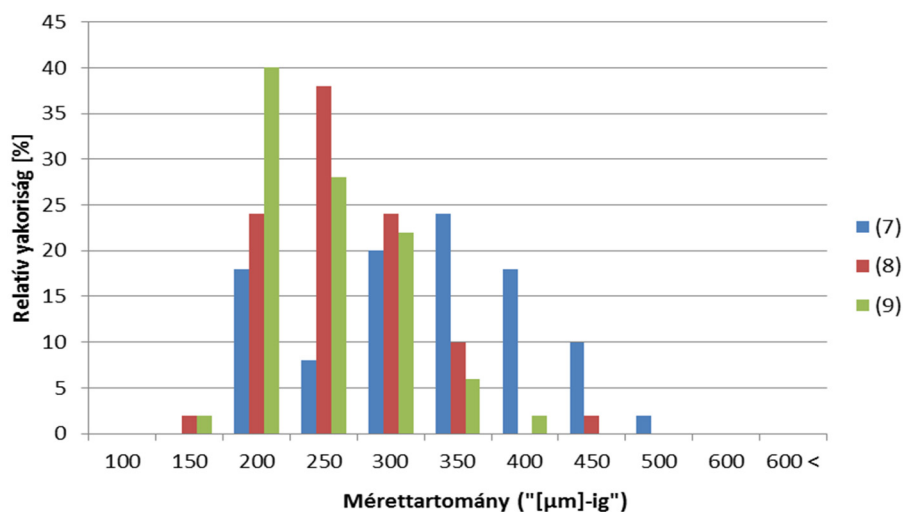
3.1.24. ábra (7) (8) (9)-es próbatest keresztmetszete (nagy. közepes, kis utónyomás, 50 °C szár. hőm.)

A habosodott réteg adatait a 3.1.8. táblázat tartalmazza. A darabok keresztmetszetében 50-50 buborék méretét mértük meg. Meg kell jegyezni, hogy a mért értékek nagy része nem a valós méretük, mert az előkészítés során nem pontosan középen vágtuk el őket. Ez azonban az összes mintára érvényes, ezért az átlagértékeket összehasonlíthatónak tekintjük. Az 50°C-on szárított alapanyag esetén az eredmények azt mutatják, hogy az utónyomás csökkentésével a habszerkezet finomodott. A buborékok maximális, átlagos mérete, illetve a szórásuk is csökkent. A (7)-es sorozatnál a mért maximális méret 485 µm, az átlagos 300 µm, a (9)-es sorozatnál már csak 360 µm a maximális, 220 µm pedig az átlagos méret. Ez közel 40, illetve 26%-os csökkenés. A szórás csökkenése arra utal, hogy a buborékok mérettartománya szűkebb lett.

Sorozat	(7)	(8)	(9)
Utónyomás profil	nagy	közepes	kicsi
Mért cellák száma db]	50	50	50
Habos réteg vastagsága [mm]	3,9	5,3	5,5
Habos rétegvastagság aránya [%]	49	62	66
Átlagos cella átmérő [µm]	301,2	236,5	221,7
Szórás	85,3	55,0	50,5
Cellák száma [db]	3837	17013	24807

3.1.8. táblázat Habréteg jellemző adatai a (7-9) mintáknál

A mért adatok eloszlását szemlélteti a 3.1.25. ábra. A diagramon jól látható a méretcsökkenés, illetve hogy a (7)-es mintánál széles mérettartományban találhatók buborékok, míg a (8)-as és (9)-esnél ez már szűkebb. Utóbbiaknál a gyakoriságok közt is nagyobb az eltérés.



3.1.25. ábra Buborékok méretének relatív gyakorisága a (7-9) mintáknál

Nyitott szerszám mellett a felületi minőségre az utónyomás jelentős hatással volt. Az utónyomás csökkentésével a darabokban kialakult habosodott réteg aránya nőtt a teljes vastagsághoz viszonyítva (3.1.8. táblázat). A vékonyabb héjrtegnek köszönhetően a termékek belsejében lévő habban kialakult nyomás a felületet jobban deformálta, így azok minősége romlott. Minél nagyobb a habosodott réteg a héjrteghez viszonyítva, a felület annál egyenetlenebb, hólyagosabb. Az alapanyag MFI-je kétszer akkora volt, mint a (10-12) mintáknál, ezért ezek a darabok rosszabb felülettel rendelkeznek, mint amelyek 150°C-on szárított alapanyagból készültek.

A (10-11-12) minták alapanyagainak szárítási hőmérséklete 150°C volt. Ezeknél a termékeknél (3.1.26. ábra) már nem figyelhetők meg az előzőhöz hasonló, fokozatosan változó habszerkezetek. Az utónyomás csökkentésével az előző mintákhoz (7-9) hasonlóan itt nem tapasztalható a buborékok méretének csökkenése, és finomabb szerkezet kialakulása.



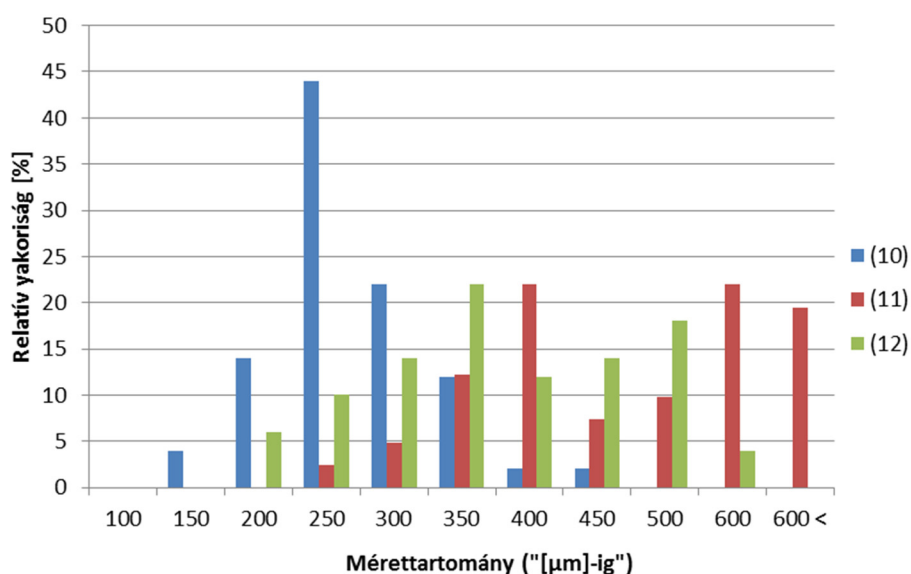
3.1.26. ábra (10) (11) (12)-es próbatest keresztmetszete (nagy, közepes, kis utónyomás, 150 °C szár. hőm.)

A 150°C-on szárított alapanyagból készült mintáknál mért buborékok méreteit a 3.1.9. táblázat tartalmazza. Itt a (7-9) mintákhoz hasonló, fokozatos tendencia nem tapasztalható. Itt nagy utónyomásnál a legkisebb a buborékok átlagos mérete, közepesnél is kicsinél pedig nagyobb, illetve nem sorrendben növekednek (közepes utónyomásnál a legnagyobb az átlagos méret). Az eredmények jellegének eltérését az alapanyag reológiai tulajdonságai okozhatják. A magas szárítási hőmérséklet miatt az anyag MFI-je kétszer akkora, mint az alacsony hőmérsékleten szárítotté. A nagyobb viszkozitás befolyásolja a habszerkezet geometriájának alakulását.

Sorozat	(10)	(11)	(12)
Utónyomás profil	nagy	közepes	kicsi
Mért cellák száma [db]	50	50	50
Habos réteg vastagsága [mm]	4,9	4,6	5,3
Habos rétegvastagság aránya [%]	60	56	63
Átlagos cella átmérő [ $\mu\text{m}$ ]	242,9	472,9	358,7
Szórás	56,3	133,6	97,9
Cellák száma [db]	11342	1818	4825

3.1.9. táblázat Habréteg jellemző adatai a (10-12) mintáknál

A 3.1.27. ábrán a 150°C-on szárított alapanyagból készült termékekben található buborékok méreteloszlását mutatja.



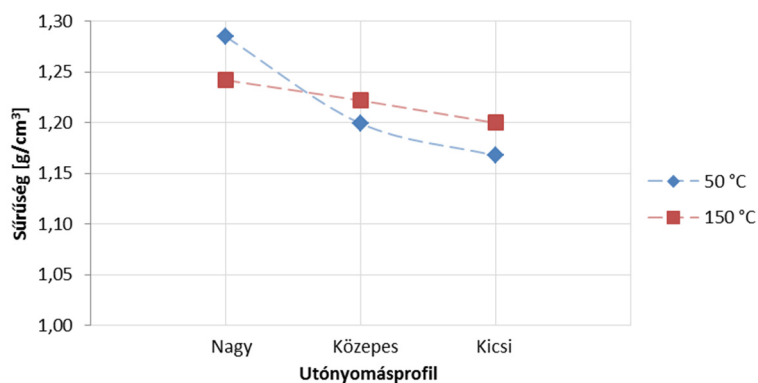
3.1.27. ábra Buborékok méretének relatív gyakorisága a (10-12) mintáknál

A minták felületének minősége láthatóan jobb, mint az 50°C-on szárított alapanyagból készültké, ez az alapanyag rosszabb folyási képességének köszönhető. Itt is megfigyelhető az a tendencia, hogy az utónyomás csökkentésével jobb felületi minőséget értünk el (a (12)-es próbatest a legjobb, a (10)-es a legrosszabb). Ezek az eredmények a (7-9) mintákhoz hasonlóan azonban nincsenek összhangban a habos réteg vastagságával (3.1.9. táblázat).

### Fizikai jellemzők - sűrűség

Az 3.1.28. ábra a termékek sűrűségét ábrázolja az utónyomás profilok függvényében. Látható, hogy mindkét alapanyag-száritási hőmérséklet esetén az utónyomások csökkentésével a sűrűség is csökkent. Alacsonyabb hőmérsékletnél először egy nagyobb, majd egy kisebb változás tapasztalható, míg magasabb szárítási hőmérséklet esetében az utónyomások változtatásával kisebb, de egyenletesebb csökkenés tapasztalható. Ezek a változások az anyag habszerkezetében kialakult nagyobb buborékoknak köszönhetőek.

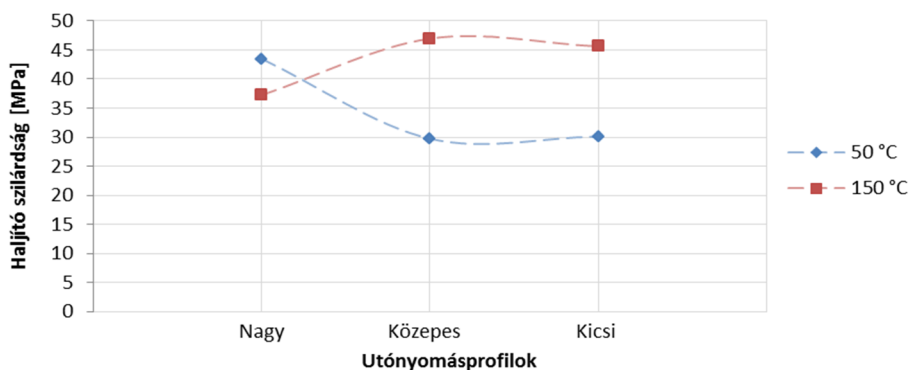




3.1.28. ábra Az utónyomásprofil hatása a sűrűségre

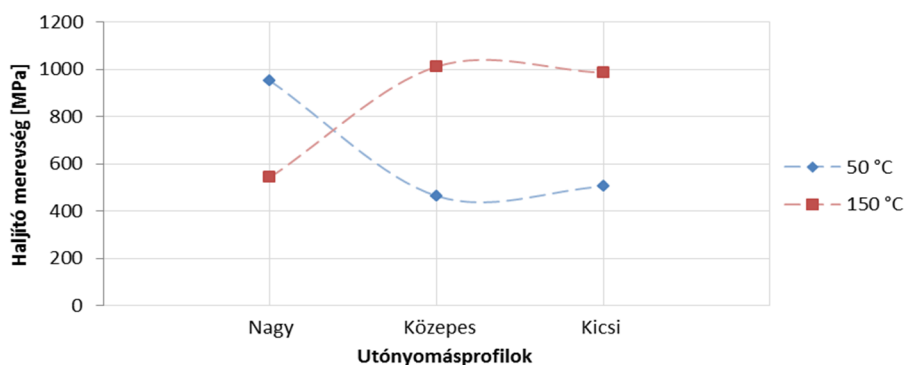
### Mechanikai jellemzők – szilárdság, modulus

A mechanikai jellemzőket 3-pontos hajlításból számoltuk. A szilárdsági eredményeket a 3.1.29. ábra a merevséget a 3.1.30. ábra tartalmazza. Az eredmények jellegében nincs különbség, csak az értékek nagyságában, ez a darabok sűrűségétől függ. Ezért célszerű a sűrűségre fajlagosított értékeket megvizsgálni, mert lehet, hogy az egyik minta mechanikai tulajdonságai gyengébbnek tűnnek a másikinál, azonban a fajlagos értékei jobbak.



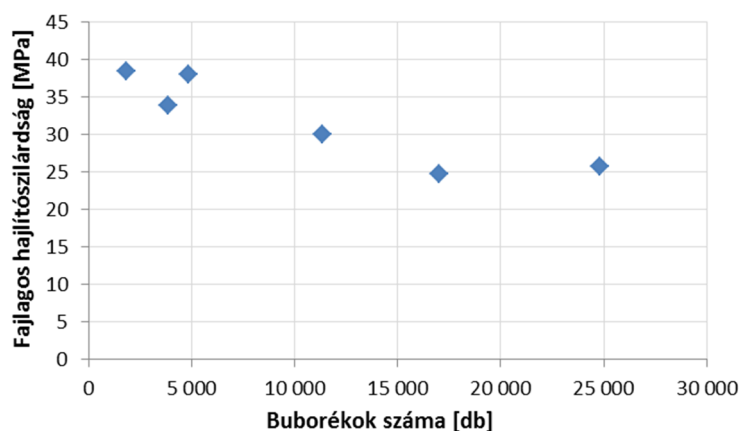
3.1.29. ábra Az utónyomás profil hatása a hajlító szilárdságra

A sűrűségekkel ellentétben a szilárdság és merevség az utónyomás csökkentésével a 150°C-on szárított anyag esetében nőtt, 50°C-os szárítás esetében csökkent. Ha ezt összevetjük az anyagok szerkezetével, észrevehető, hogy azokban az esetekben nagyobb a szilárdság és modulus – (7), (11) és (12) minták –, ahol nagyobb buborékok alakultak ki a szerkezetben. A nagyobb buborékokból a termékben kevesebb van, ezek kevésbé „szakítják meg” az anyag folytonos szerkezetét, ez kedvez a mechanikai tulajdonságoknak

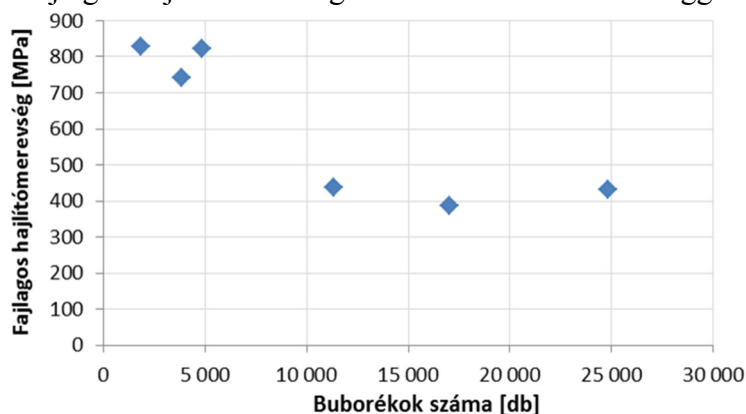


3.1.30. ábra Az utónyomás profil hatása a hajlító merevségre

A hatféle minta esetén jól megfigyelhető, hogy mért szilárdsági értékek a buborékok számával és méretével összefüggésben vannak. A 3.1.31. és 3.1.32. ábra a fajlagos mechanikai tulajdonságokat ábrázolja a buborékok számának függvényében. A több buborékot tartalmazó minták szilárdsági és merevségi értékei közel 35-40%-kal gyengébbek.

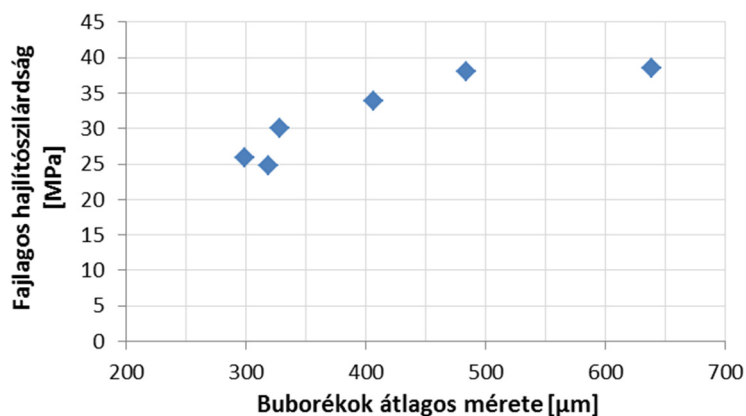


3.1.31. Fajlagos hajlítószilárdság a buborékok számának függvényében

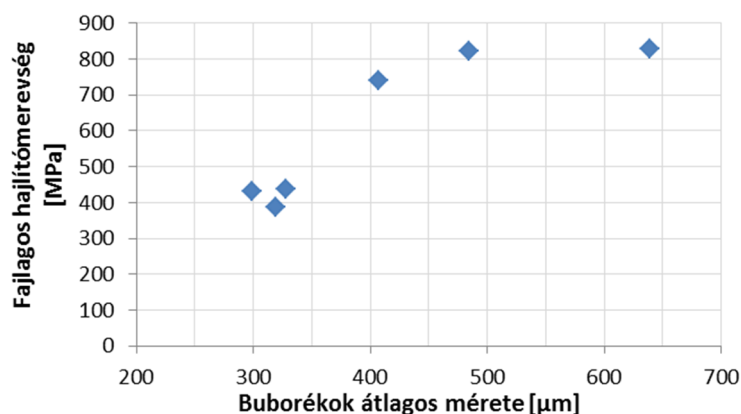


3.1.32. ábra Fajlagos hajlító merevség a buborékok számának függvényében

A mechanikai tulajdonság az átlagos buborékméret függvényében az előzőhöz hasonlóan alakultak. A szilárdsági értékeket a 3.1.33. ábra, a merevségeket a 3.1.34. ábra szemlélteti.



3.1.33. ábra Fajlagos hajlítószilárdság a buborékok átlagos méretének függvényében



3.1.34. ábra Fajlagos hajlító merevség a buborékok átlagos méretének függvényében

### 3.1.7.2. Átkapcsolási pont hatásának vizsgálata

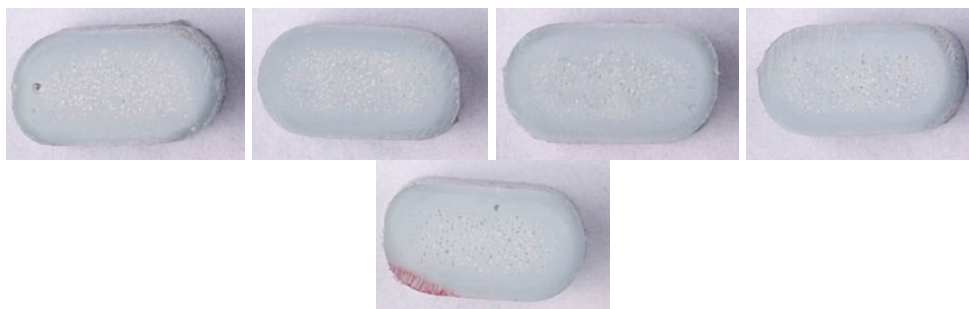
Az átkapcsolási pont növelésével a befroccsöntéskor kevesebb anyagot juttatunk a szerszámba, ezt kompenzálандó utónyomásakor pedig többet. Ez a nyomás alacsonyabb a fröccsnyomásnál, így elvileg a termékbe egyre kevesebb anyag jut. Ilyenkor az alapanyagban lévő habosító anyag jobban kifejtheti hatását. A termék belsejében nagyobb habszerkezet alakulhat ki, ezáltal csökkenhet a sűrűsége. A minták gyártása során az átkapcsolási pontot többször is változtattuk, majd vizsgáltuk a kialakult habszerkezetet, illetve a termék fizikai és mechanikai tulajdonságait. Az alapanyag adatait és a főbb, ill. változó paramétereket a 3.1.10. táblázat tartalmazza.

Jelölés	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
Alapanyag	RPET + 2% láncnövelő + 4% Safoam hab..				
Utónyomás [bar]/[s]/[bar]/[s]/[bar]	400/2/200/1/50				
Adagtérfogat [cm <sup>3</sup> ]	40				
Átkapcsolási pont [cm <sup>3</sup> ]	14	18	22	26	30

3.1.10. táblázat Alapanyag adatok és a főbb technológiai paraméterek

### Habszerkezet, felületi minőség

A kialakult habszerkezeteket a 3.1.35. ábra szemlélteti. A habosodott rétegek közt szemmel nem nagyon látható a változás (bár a buborékok méretében vannak különbségek). Ami viszont jól megfigyelhető, hogy az első, (13)-as minta kivételével mindegyikben keletkeztek lunkerek a próbatestek végében. A legnagyobb átkapcsolási pontoknál – (16)-os és (17)-es minták – már elég nagy, illetve több lunker is keletkezett.

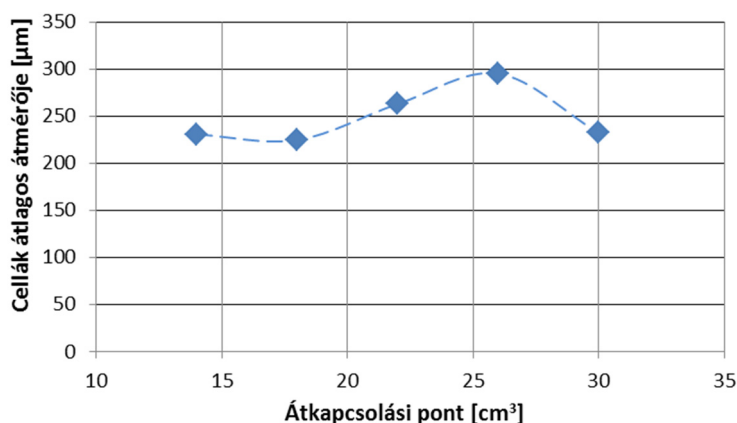


3.1.35. ábra (13) (14) (15) (16) (17)-es próbatest keresztmetszete (átkapcsolás: 14, 18, 22, 26, 30 cm<sup>3</sup>)

A buborékok jellemző méreteit a 3.1.11. táblázat tartalmazza, az átlagos méretüket az átkapcsolás függvényében pedig a 3.1.36. ábra szemlélteti. Az átlagos méretek növekvő tendenciára utalnak, kivéve a (14)-es mintát, ahol minimális csökkenés tapasztalható az előzőhöz képest, illetve az utolsó, (17)-es mintát, melynek eredménye kilóg a sorozatból, szinte megegyezik az első, (13)-as sorozatával. A mérés pontatlansága és hibái mellett a növekvő értékek a termékbe juttatott anyag mennyiségével összefüggésbe hozhatók. A kevesebb anyag a próbatest belsejében kisebb nyomást okoz, így a buborékoknak, ha csak kis mértékben is, de lehetőségük van jobban expandálni.

Sorozat	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)
Habos réteg vastagsága [mm]	5,4	5,1	5,4	5,2	4,9
Habos rétegvastagság aránya [%]	65	62	65	63	59
Mért cellák száma [db]	50	50	50	50	50
Átlagos cella átmérő [ $\mu\text{m}$ ]	<b>230,5</b>	<b>224,5</b>	<b>262,7</b>	<b>295,0</b>	<b>232,1</b>
Szórás	48,1	40,5	46,9	64,8	76,4
Cellák száma [db]	16307	18146	11912	7734	18292

3.1.11. táblázat A buborékok jellemző méretei a (13-17) mintáknál



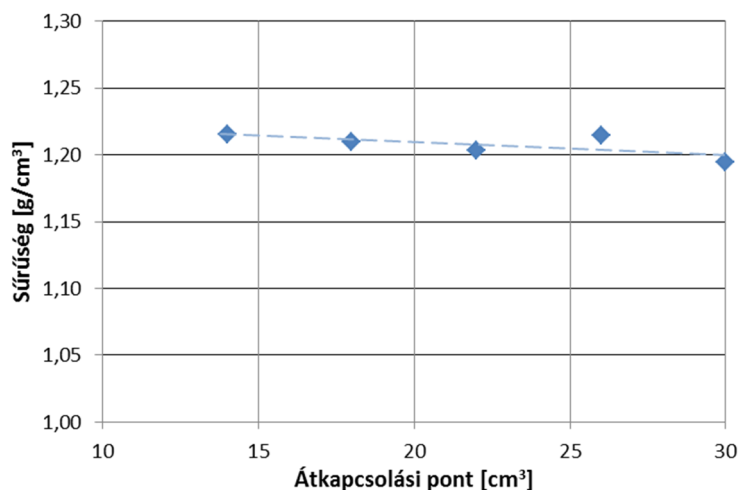
3.1.36. ábra Buborékok átlagos mérete az átkapcsolási pont függvényében

Az átkapcsolási pont növelésével kevesebb anyagot juttatunk a szerszámba, ezáltal a termékekben kevesebb anyag lesz, illetve kisebb belső feszültség keletkezik. A habos réteg ezt a csökkenő belső feszültséget ellensúlyozza bizonyos fokig. A termékek felületi minősége az átkapcsolási pont növelésével láthatóan javult. A legérdekesebb a (13)-as próbatest, a (14)-es és (15)-ös minták már kevésbé érdekesek. A (16)-os és (17)-es minták felülete már majdnem teljesen sík, csak néhány helyen érezhető az egyenetlen felület. Az eredményekből arra lehet

következtetni, hogy a (15-16) próbatesteknél beállított értékek (3.1.10. táblázat) közt – 22-26 cm<sup>3</sup> – közt van egy határérték, ami felületi minőség szempontjából jelentős hatással van a gyártott darabokra. Ennél a pontnál egy jelentős javulás tapasztalható a termék felületén, ez a javulás az értékek folyamatos növelésével folytatódik, bár érezhetően kisebb mértékben.

### Fizikai jellemzők - sűrűség

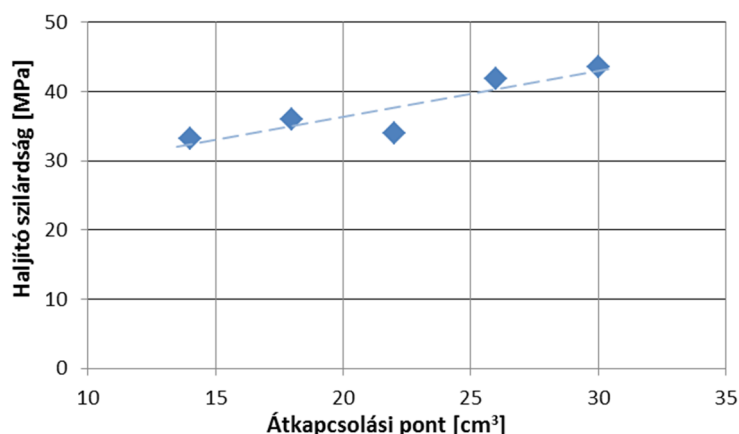
A 3.1.37. ábra a sűrűségeket szemlélteti az átkapcsolási pont függvényében. A habszerkezethez hasonlóan jelentős változás itt sem tapasztalható, azonban kismértékű sűrűségcsökkenés következett be az átkapcsolási pont növelésével. Ezt az utónyomás során bejuttatott egyre kevesebb anyagmennyiség okozta.



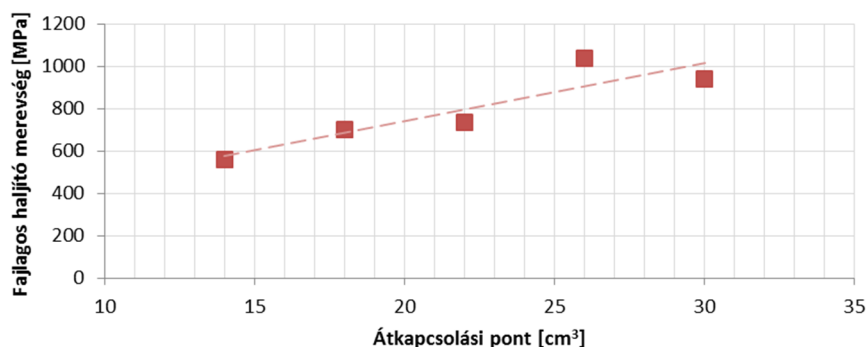
3.1.37. ábra Az átkapcsolási pont hatása a sűrűségre

### Mechanikai jellemzők – szilárdság, modulus

A szilárdsági értékeket a 3.1.38. ábra, a merevségi értékeket a 3.1.39. ábra szemlélteti. Az eredményeket itt is 3-pontos hajlításból számoltuk. Látható, hogy mind a szilárdsági, mind a merevségi értékek növekedtek az átkapcsolási pont növelésével. Mindkét mechanikai jellemző mutat hasonlóságot az utónyomás hatása során vizsgált minták eredményeivel. Az eredmények jellege itt is hasonló: ahol nagyobbak a buborékok a mintákban, ott a szilárdsági értékek is magasabbak.



3.1.38. ábra Az átkapcsolási pont hatása a hajlító szilárdságra



3.1.39. ábra Az átkapcsolási pont hatása a hajlító merevségre

### 3.1.7.3. A szerszámhőmérséklet hatásának vizsgálata

A termék felületi minőségének javítása céljából vizsgáltuk a különböző szerszámhőmérsékletek hatását. A főbb beállítási értékeket 3.1.12. táblázat tartalmazza. Alacsonyabb szerszámhőmérsékletnél az ömledék gyorsabban hűl le, illetve nagyobb héjréteg dermed le a kitöltés közben, ezáltal vastagabb héjréteg, és jobb felületi minőség várható.

Jelölés	(20)	(21)	(22)
Alapanyag	RPET + 2% láncnövelő + 4% Safoam hab.		
Száritási hőmérséklet [°C]	150		
Utónyomás [bar]/[s]/[bar]/[s]/[bar]	130/2/50/1/25		
Átkapcsolási pont [cm³]	21		
Szerszámhőmérséklet [°C]	35	50	65

3.1.12. táblázat Alapanyag adatok és a főbb technológiai paraméterek

### Habszerkezet, felületi minőség

A minták habszerkezetének jellemző adatait a 3.1.13. táblázat tartalmazza, a keresztmetszetükről készült képeket a 3.1.40. ábra szemlélteti. A szerszámhőmérséklet növelésével a buborékok száma csökkent a keresztmetszetben. Az átlagos méretük az 50, ill. 65°C-os mintáknál közel azonos volt, a 35°C-osnál pedig ezeknél kisebb. A keresztmetszetben a buborékok nagy része a középső, erősen habos rétegben helyezkedik el, azonban mindegyik próbatestnél található a héjrétegben is néhány buborék.

Sorozat	(20)	(21)	(22)
Szerszámhőmérséklet [°C]	35	50	65
Habos réteg vastagsága [mm]	5,4	5,8	6
Habos rétegvastagság aránya [%]	61	69	68
Mért cellák száma [db]	50	50	50
Átlagos cella átmérő [μm]	<b>180,6</b>	<b>257,0</b>	<b>257,9</b>
Szórás	46,2	96,2	99,8
Cellák száma [db]	83883	26950	22359

### 3.1.13. táblázat A buborékok jellemző méretei a (20-22) mintáknál

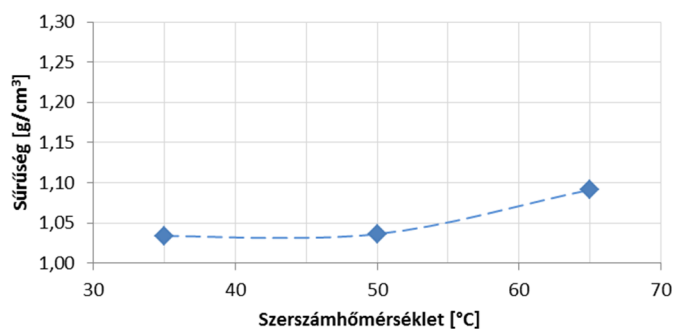


3.1.40. ábra (20) (21) (22)-es próbatest keresztmetszete ( $T_{\text{szerszám}}$ : 35, 50, 65 °C)

Mindegyik darab felülete érdes, jelentős méretű „hólyagok” képződtek a felületen. A minták vastagsága 8,5-9 mm közötti, a termék geometriája eredetileg 8 mm vastag, a 0,1 mm-es szerszámnyitással ez 8,2 mm. Ez azt jelenti, hogy a darabok felülete a szerszámból való eltávolítás után is jelentős mértékben változott. Az előző kísérletektől eltérően itt a darabok héjrtegében is számos buborék található, ezek okozhatták a jelentős felhólyagosodást a felületen. Azoknál a daraboknál, melyeknél a héjrtegben nincsenek buborékok, ez nem, vagy kevésbé tapasztalható. A jelenség mindhárom szerszámhőmérsékletnél megfigyelhető volt.

### Fizikai jellemzők - sűrűség

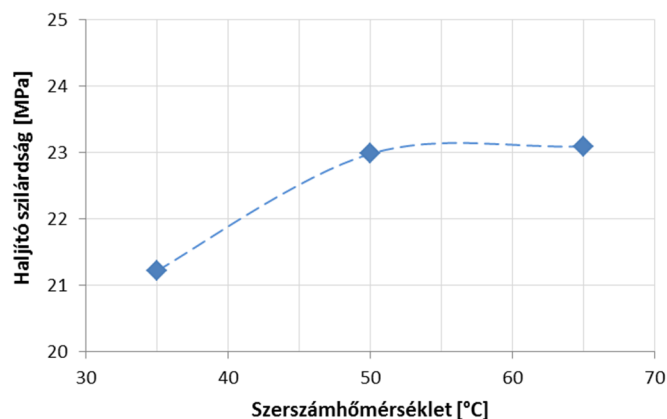
A 3.1.41. ábra a minták sűrűségeit mutatja a szerszámhőmérséklet függvényében. A hőmérséklet emelése a sűrűséget néhány tized  $\text{g/cm}^3$ -rel növelte, csökkentése nem változtatta jelentősen. A 22°C-os próbatestekben a buborékok száma nagyon nagy volt (~84000), azonban átlagos méretük a legkisebb (~180  $\mu\text{m}$ ) a három minta közül. Az 50°C-os és 65°C-os próbatesteknél a buborékok átlagos mérete azonos (~260  $\mu\text{m}$ ), de a mennyiségük eltérő, 50°C-os próbatestnél ~27000, 65°C-osnál ~23000 darab található a vizsgált térfogatban. Ez a különbség okozhatta a minimális eltérést a sűrűségben, amíg a 35°C-os és 50°C-os mintáknál a kevesebb nagyobb és több kisebb buborék azonos hatással volt a sűrűségre.



3.1.41. ábra A szerszámhőmérséklet hatása a sűrűségre

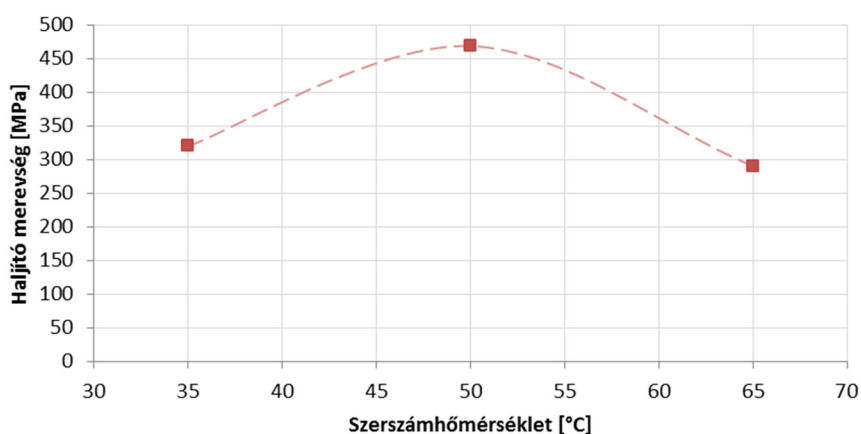
### Mechanikai jellemzők – szilárdság, modulusz

A 3.1.42. ábra a hajlítoszilárdságot ábrázolja a szerszámhőmérséklet függvényében. A hőmérséklet növelésével a szilárdsági értékek javultak, 35°C-nál 21 MPa, 50, ill. 65°C-nál 23MPa volt a mért, érték. Ez azzal magyarázható, hogy nagyobb szerszámhőmérsékletnél a termékben a befroccsöntéskor kisebb réteg fagy le, illetve az anyag dermedése lassabb, így nagyobb a kristályos anyagrész aránya, ami jobb mechanikai tulajdonságokkal rendelkezik.



3.1.42. ábra A szerszámhőmérséklet hatása a hajlító szilárdságra

A mért merevségi értékeket a 3.1.43 ábra szemlélteti. Látható, hogy a legnagyobb merevsége az 50°C-os mintának volt, a 65, ill. 35°C-osaké ennek körülbelül kétharmada. A hajlítás során a legnagyobb terhelést a darab szélső rétegeik viselik. Ezeknél a daraboknál sem a külső méret, sem a habosodott réteg vastagsága nem állapítható meg kellő pontossággal. A darabok felülete nagyon egyenetlen, érdes, a belsejükben pedig nem különül el kellően a habos magréteg, így mindegyik mérésénél tized mm-es hibák keletkezhetnek, amik jelentősen torzíthatják az eredményeket.



3.1.43. ábra A szerszámhőmérséklet hatása a hajlító merevségre

### 3.1.8. Összefoglalás

Az RPET kémiai habosítással végrehajtott extrudálási valamint fröccsöntési technológia vizsgálata után megállapítottuk, hogy az általunk használt kristályosított, kék színű palack regranulátum alkalmas zárt cellás habszerkezet kialakítására. Ehhez 2% láncnövelő adalékra valamint 4% habosítószerre van szükség. A feldolgozás előtt kellően ki kell szárítani az alapanyagot, a megfelelő reológiai tulajdonságok elérése érdekében. A fröccsöntéssel történő feldolgozás esetén nagy átkapcsolási pontot kell alkalmazni (befröccsöntéskor több anyagot kell bejuttatni a szerszámba), amelyet kis utónyomásnak kell követni, hogy a habképződés létrejöhessen. A megfelelő esztétikai megjelenés eléréséhez közepes szerszám hőmérsékletet érdemes alkalmazni.



## Szakirodalom

- [1] Kné Pál: Műanyaghabok, Műanyagipari Szemle, 6, pp. 1-10, 2006
- [2] T. Czvikovszky, P. Nagy, J. Gaál: A polimertechnika alapjai, Műegyetemi Kiadó, Budapest, 2000.
- [3] T. Bárány: Polimer habok, Polimerfeldolgozás és gépei tantárgyi segédlet, [www.pt.bme.hu](http://www.pt.bme.hu), 2014
- [4] N. Miskolczi: Műanyagok feldolgozása, Pannon Egyetem, Digitális Tankönyvtár, 2012
- [5] N. Mills: Polymer foams handbook, Butterworth-Heinemann, Amsterdam, 2007
- [6] M. Chanda, S. K. Roy: Plastics Technology Handbook, Taylor & Francis Group, LLC, 2006
- [7] O. Schwarz, F.-W. Ebeling, G. Lüpke, W. Schelter: Műanyag-feldolgozás, Műszaki Könyvkiadó, Budapest, 1987
- [8] Sz. Orbán: Innovációk és újdonságok a műanyagok építőipari alkalmazásában, Műanyagipari Szemle, 2, pp. 1-7, 2010
- [9] I. Molnár, J. Seder: Integrál habszerkezetű műanyagok fröccsöntése, kézirat, Budapesti Műszaki Egyetem Továbbképző Intézete, Budapest, 1976
- [10] Kné Pál: Poliamid és PET habosítása, Műanyagipari Szemle, 3, pp. 1-8, 2011
- [11] A. Dunai., L. Macskási: Műanyagok fröccsöntése, Lexica Kft., Budapest, 2003
- [12] E. Placido, M.C. Arduini-Schusterb, J. Kuhn: Thermal properties predictive model for insulating foams, Infrared Physics & Technology, 3, pp. 219-231, 2005
- [13] F. Farkas: Poliuretánok, Kémszám Bt., Budapest, 2004
- [14] P. Gröb: A gyártástechnológiai paraméterek hatása poliuretán integrálhab termékek tulajdonságaira, PhD értekezés, Budapesti Műszaki Egyetem, 2008
- [15] W. Michaeli, D. Obeloer: Schaumdesign, Plastverarbeiter, 60/4, pp. 80–82, 2009
- [16] Csné Máthé: Hőre lágyuló műanyagok és szilikongumik fizikai habosítása, Műanyagipari Szemle, 1, pp. 1-6, 2010
- [17] J. Thorne: Low-Density PET Foam, Part I, Sherwood Technologies, [www.foamandform.com](http://www.foamandform.com), 1997
- [18] B. Thier, E. Naudorf: BASF acquires extrusion technology from B.C. Foam: PET foams for the wind energy sector, BASF, [www.basf.com](http://www.basf.com), 2012
- [19] Engineered foams, Armacell webpage, [www.armacell.com](http://www.armacell.com), 2014
- [20] J. H. Schut: Foamed Pet Sheet Tackles New Markets, Plastics Technology, [www.ptonline.com](http://www.ptonline.com), 2001
- [21] G-PET Recyclable structural foam, datasheet, [www.gurit.com](http://www.gurit.com), 2014
- [22] J. Scheirs: Additives for the Modification of Poly(Ethylene Terephthalate) to Produce Engineering-Grade Polymers, in eds. J. Scheirs, T.E. Long: Modern Polyesters: Chemistry and Technology of Polyesters and Copolyesters, Wiley, 2003

- [23] M. Xanthos, R. Dhavalikar, V. Tan, S. K. Dey, U. Yimlazer: Properties and applications of sandwich panels based on PET foams, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 20/9, pp. 786-793, 2001
- [24] M. Xanthos, U. Yilmazer, S. K. Dey, J. Quintans: Melt Viscoelasticity of Polyethylene Terephthalate Resins for Low Density Extrusion Foaming, *Polymer Engineering and Science*, 3, pp. 554-566, 2004
- [25] S. Japon, Y. Letterrier, J.-A. E. Manson: Recycling of Poly(Ethylene Terephthalate) Into Closed-Cell Foams
- [26] E. Turfa: Extrudált szigetelőlemez előállítása műanyag hulladékból, diplomamunka, konzulensek: F. Ronkay, G. Dogossy, 2013
- [27] B. Molnár: Polietilén-tereftalát habosításának vizsgálata, diplomamunka, konzulensek: F. Ronkay, G. Dogossy, 2013